



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2020 30 stp**  
Fakultetet for realfag og teknologi

## **Metodikk for kalibrering og verifisering av en overvannsmodell**

Methodology for calibration and verification of a  
storm water management model

**Bjørnar Merli**  
Vann- og miljøteknikk



# Forord

Denne oppgaven markerer slutten på to og et halvt år som masterstudent ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Det har vært en morsom og lærerik tid.

Masteroppgaven tar utgangspunkt i et overvannsnett på Kolbotn, og jeg vil takke Randi Aamodt for modellen som er grunnlaget for oppgaven, kontakten med NVE og caseområdet. Håper oppgaven og modellen vil være til nytte videre i kommunens arbeid. Jeg vil også takke Vegard Nilsen for innspill i SWMM modelleringen.

En stor takk går til familie og venner for både faglig og personlig støtte gjennom denne perioden. En stor takk går også til min hovedveileder Kim Haukeland Paus for god veiledning, nyttige innspill og faglige tilbakemeldinger.

Ås, desember 2020

Bjørnar Merli



## Sammendrag

Komplekse overvannssystemer er ofte svært krevende å dimensjonere og analysere. Det er derfor nødvendig å utvikle hydrauliske modeller som beskriver transportsystemer for overvann i nedbørsfelt. Dette for å øke kunnskapen knyttet til muligheter og begrensning i det eksisterende overvannssystemet. Slike modeller kan også brukes til å undersøke fremtidige scenarier knyttet til boligfortetting, ledningsrehabilitering og klimaendringer, samt evaluere effekten av tiltak i nedbørsfeltet. To forutsetninger for at modellen skal gi en tilstrekkelig god beskrivelse av systemet er: (1) Det eksisterende ledningsnett er identifisert og lagt inn tilfredsstillende i modellen og (2) Modellen er kalibrert mht. nedbør-avrenning. En gjennomgang av tidligere modelleringspraksis i Norge viser at det er stor variasjon og et betydelig kunnskapsbehov knyttet til begge forutsetninger. Formålet med denne oppgaven er derfor å utvikle en metodikk som beskriver hvordan de to forutsetningene kan imøtekommes. For å utvikle metodikken er det tatt utgangspunkt i et urbant felt med utstrekning på 116 ha, lokalisert i Nordre Follo kommune. Feltet er modellert med SWMM, hvor det i kalibreringen er benyttet målt nedbør og vannføringsdata med tidsoppløsning på 5 minutter i perioden 03. juni 2020 til 25. oktober 2020. Resultatet fra oppgaven er en punktvis fremstilling av hvordan en modell for overvannssystem kan utvikles, kalibreres og verifiseres. De kritiske parameterne for utvikling av modellen er: Plassering av og dimensjon på rørledninger og kummer, samt arealet på nedbørsfeltet. Videre er de kritiske parameterne for kalibrering: Infiltrasjon, permeabilitet og feltbredde. Det er også essensielt med gode måledata for nedbør og vannføring. Det konkluderes med at gode grunnlagsdata og en grundig evaluert verifisering er viktige forutsetninger for å utvikle en tilfredsstillende beskrivelse av overvannssystemet. I fremtidig arbeid foreslås det videre å etterprøve metodikken for andre nedbørsfelt, legge inn grunnvannberegninger og verifisere modellen for flere kontrollpunkter i overvannsnett.



## Summary

Complex stormwater systems are often quite difficult to design and analyze. Development of models describing transportation systems for storm water in a catchment area is therefore necessary in order to increase knowledge related to the possibilities and limitations of the existing stormwater system. Hydraulic models can also be used to investigate future scenarios related to urban development, pipe rehabilitation and climate change, as well as evaluating the effect of LID control in the catchment area. Two prerequisites for the model to be able to provide a sufficient description of the network are: (1) that the existing stormwater network has been identified and build satisfactory in the model and (2) that the model has been calibrated with regard to precipitation generated runoff. A review of previous modeling practices in Norway shows that there is great variation and a significant need for knowledge related to both prerequisites. The purpose of this thesis is therefore to develop a methodology that describes how the two prerequisites can be met. In order to develop the methodology, a case study for a 116 hectare large urban catchment, located in Nordre Follo municipality. The catchment is constructed in SWMM, and measured precipitation and water flow data in the period 03. June 2020 to 25. October 2020 have been used for the calibration. The result from the thesis is a point-by-point recipe of how a stormwater network model can be constructed, calibrated and validated. The critical parameters for the development of the model are: Area, pipelines, manholes and their dimensions. Furthermore, the critical parameters for calibration are: Infiltration, permeability and subcatchment width. God measurements data for precipitation and water flow is also essential for calibration. It is therefore concluded that obtaining good field data and thorough validation are important prerequisites for developing a good recipe. In future work, it is proposed to test the recipe for other catchments, add groundwater and validate the model for several control points of the stormwater network.





# Innhold

Forord . . . . .	i
Sammendrag . . . . .	iii
Summary . . . . .	v
Innhold . . . . .	vii
Figurer . . . . .	ix
Tabeller . . . . .	xi
Forkortelser . . . . .	xiii
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstilling . . . . .	1
1.2 Forskningsspørsmål . . . . .	2
1.3 Fremgangsmåte og omfang . . . . .	2
<b>2 Bakgrunn</b>	<b>3</b>
2.1 Modeller for overvannssystemer . . . . .	3
2.2 Gjennomgang av gjeldene praksis . . . . .	3
2.3 Oppbygning av modell . . . . .	5
2.4 Effektivitetsligning for simulering . . . . .	6
2.5 Praksis for kalibrering og verifisering . . . . .	7
<b>3 Metode</b>	<b>9</b>
3.1 Case-området . . . . .	9
3.1.1 Grunnlagsdata . . . . .	10
3.1.2 Kummer og rørledninger . . . . .	10
3.1.3 Strekninger med åpen bekk . . . . .	10
3.1.4 Nedbørfelt og delnedbørfelt . . . . .	11
3.1.5 Initialverdier . . . . .	12
3.1.6 Grunnvann og innlekking . . . . .	14
3.2 Måledata . . . . .	14
3.2.1 Nedbør . . . . .	14
3.2.2 Vannføringsdata . . . . .	16

3.3	Kalibrering og verifisering . . . . .	17
3.3.1	Sensitivitetsanalyse . . . . .	17
3.3.2	Kalibreringsmetode . . . . .	18
3.3.3	Verifisering . . . . .	19
3.4	Utvikling av metodikk for modell-opbygning, kalibrering og verifisering	19
<b>4</b>	<b>Resultater og diskusjon</b>	<b>21</b>
4.1	Kalibrering . . . . .	21
4.1.1	Sensitivitetsanalyse . . . . .	22
4.1.2	Resultater av kalibreringen . . . . .	22
4.1.3	NSE & KGE . . . . .	26
4.2	Verifisering . . . . .	27
4.3	Grunnlagsdata for modell over case-området . . . . .	29
4.4	Generalisering/Forenklinger . . . . .	34
4.5	Metodikk . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>43</b>
5.1	Videre arbeid . . . . .	44
	<b>Referanser</b>	<b>45</b>
	<b>Vedlegg A Nedbørsfeltparameter NEVINA</b>	<b>49</b>

# Figurer

2.1	Statistikk for tidligere masteravhandlinger . . . . .	5
3.1	Strekning med opparbeidet bekk, og overløp. . . . .	11
3.2	Delfelt av det totale nedbørsfeltet i SWMM. . . . .	12
3.3	Infiltrasjonkart for case-området . . . . .	13
3.4	Sammenligning av nedbør . . . . .	15
3.5	Målekum for observert vannføring . . . . .	17
4.1	Sensitivitetsanalyse . . . . .	22
4.2	Nedbørhendelser uten tørrperiode i forkant . . . . .	24
4.3	Simuleringsresultat for nedbørshendelse 2 og 3. . . . .	25
4.4	Simuleringsresultat for nedbørshendelse 1, 17 og 19. . . . .	26
4.5	Sammenligning av NSE og KGE . . . . .	27
4.6	Verifisering av kalibrert modell . . . . .	28
4.7	Grafisk fremstilling av RDII . . . . .	30
4.8	Simulert vannføring ved generalisering . . . . .	36



# Tabeller

2.1	Kalibrering- og verifiseringsgrunnlag for tidligere studier . . . . .	7
2.2	Parametere kalibrert i tidligere studier . . . . .	8
3.1	Komponentene i SWMM modellen. . . . .	10
3.2	Initialverdier for SWMM modellen. . . . .	14
3.3	Omregningsformler for tverrsnittet i målekum. . . . .	16
3.4	Grenseverdier for kalibrering og sensitivitetsanalyse . . . . .	18
4.1	Beregnet volum, NSE og KGE for kalibrert modell . . . . .	23
4.2	Resultater for nedbørshendelser med tørrperiode i forkant . . . . .	25
4.3	Resultater for nedbørshendelsene i verifiseringen . . . . .	28
4.4	Verdier for parameterne etter kalibrering. . . . .	31
4.5	Beregnet volum NSE og KGE for generalisert modell . . . . .	35
4.6	Metodikk for oppbygning, kalibrering og verifisering av modell. . . . .	37



# Forkortelser

EPA	Environmental Protection Agency
KGE	Kling-Gupta Efficiency
LOD	Lokal overvannsdiskonering
NEVINA	Nedbørfelt Vannføring INdeks Analyse
NSE	Nash–Sutcliffe Efficiency
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
RDII	Rainfall Derived Infiltration and Inflow
SWMM	Storm Water Management Modeling





# 1. Introduksjon

Et overvannsnett blir bygget ut og fornyet over lang tid. Kapasitetsberegninger er ofte gjort når strekningene blir etablert første gang, noe som kan føre til underdimensjonerte strekninger etter flere år med urbanisering og økt avrenning. Hydraulikken for hele nettet blir vanskeligere å beregne etter som nettet blir større og mer komplekst. For mange kommuner i Norge er datagrunnlaget relativt sett dårlig og høydedata for ledninger og kummer er ofte mangelfullt. En overvannsmodell, som ved bruk av historiske og fremtidige nedbørsdata kan simulere vannføringen i ledningsnettet, kan derfor bidra til å indentifisere hvilke strekninger og områder som det er mest kritisk å utbedre, samt vurdere effekten av ulike tiltak.

## 1.1 Problemstilling

En modell som bygger på manglende parameterinformasjon og innmålinger kan gi store avvik fra virkeligheten. Hvis den simulerte vannføringen for en kalibrert og verifisert modell samsvarer godt med observert vannføring, kan den brukes til kapasitetsanalyser og vurderinger knyttet til effekt for ulike overvannstiltak. En god metodikk for oppbygning av en modell og verifisering av denne vil være et godt verktøy for arbeidet med overvannsmodeller. Det er behov for å klargjøre hvilke datagrunnlag som er nødvendig for å oppnå en godt verifisert modell. Det finnes flere fremgangsmåter for kalibrering av overvannsmodeller, og antallet parameterverdier som endres i kalibreringen varierer for de ulike metodene. Metodene for kalibrering har ulik tilgjengelighet og bruker en variasjon av nedbørhendelser og datagrunnlag. Manglende måledata kan føre til modellen ikke blir kalibrert, og simuleringsresultatet vil da kunne avvike kraftig fra virkeligheten. En metodikk for oppbygning, kalibrering og verifisering kan bidra til en høyere kvalitet for overvannsmodeller og øke kunnskapen om hvilke konsekvenser ulike forenklinger vil ha for modellen. En utarbeidet metodikk kan også bidra til en lavere terskel for godt kalibreringsarbeid, selv hos kommuner som ikke har ressurser med nødvendig erfaring og kunnskap innenfor modelloppbygning og kalibrering.

## 1.2 Forskningsspørsmål

### 1. Hvilke forutsetninger gjelder for oppbygning av en overvannsmodell?

- Hvilke parametere er essensielle for oppbygningen av en overvannsmodell?
- Hva er en god fremgangsmåte for modeller med mangelfullt datagrunnlag?

### 2. Hvilke forutsetninger gjelder for kalibrering og verifisering av en overvannsmodell?

- Hvordan kan en overvannsmodell kalibreres manuelt?
- Hvilke parametere er mest kritisk med hensyn til kalibrering?
- Hvordan kan verifiseringen av modellen indikere hva overvannsmodellen kan brukes til?

### 3. Hvordan kan det utvikles metodikk for oppbygning, kalibrering og verifisering av en overvannsmodell.

- Hvilke steg bør metodikken inneholde?
- Hva er usikkerheten for de ulike stegene, og hva er nødvendig datagrunnlag?

## 1.3 Fremgangsmåte og omfang

Oppgavens forskningsspørsmål blir forsøkt besvart gjennom et case-studie der prosessen med å bygge opp en modell med manglende datagrunnlag blir gjennomgått. Parameterverdier i modellen blir etter kalibrering forsøkt forenklet for alternative fremgangsmåter i metodikken. Usikkerhet for de ulike stegene blir diskutert gjennom valgene av metoder, og i drøfting av datagrunnlaget. Manglende grunnlagsdata, fremgangsmåte for oppbygning, kalibrering og verifisering blir vurdert opp mot hva som er gjort tidligere i relevant litteratur.

Formålet med metodikken som utvikles i denne oppgaven er at den skal kunne brukes av ressurser uten tilgang på lisensbaserte programvare og/eller kompetanse på koding. Derfor har all kalibrering i oppgaven blir gjennomført uten automatikk. Det er også lagt vekt på å bruke grunnlagsdata som er tilgjengelig uten lisens eller annen betalingsmur.

## 2. Bakgrunn

Overvannsmodeller kan benyttes for mange formål. Det er flere programmer for å modellere overvannssystemer, men det er forskjeller i hvor anvendelige disse programmene er, og hvilke muligheter de har for kalibrering. I dagens praksis er det ikke alle overvannsnett som er modellert, og ikke alle modellerte overvannsnett blir kalibrert. Kalibrering og verifisering er viktig for å kunne utnytte potensialet til overvannsmodellene, og for å redusere usikkerhet.

### 2.1 Modeller for overvannssystemer

Formålet med en modell for overvannssystemer er flerdelt. Kapasitetsberegninger, forventede konsentrasjoner av forurensing og tiltakseffekt fra LOD-tiltak er noen av funksjonene overvannsmodeller kan brukes til. Det finnes flere program for modellering og simulering av overvannssystemer. Noen av disse er: MIKE URBAN, Autodesk Civil 3D, EPA SWMM, PC-SWMM, HEC-RAS og HEC-HMS. HEC-RAS og HEC-HMS er lisensfrie program utviklet av det amerikanske forsvaret for blant annet kanalstrømning og simuleringer av større nedbørsfelt (USACE, 2020b,a). Mike URBAN og Autodesk Civil 3D er lisensbaserte program som kan kjøre 3D modeller av vannsystemene (DHI, 2020; Autodesk, 2020). PC-SWMM er lisensbasert og har mange av de samme funksjonene som EPA SWMM, men i tillegg muligheter for kalibrering og ulike analyser. EPA SWMM er lisensfritt, men har ingen funksjoner for kalibrering eller verifisering i brukergrensesnittet. EPA SWMM er en kombinert hydrologisk, hydraulisk og vannkvalitetsmodell. Den kan brukes til dimensjonering av ledningsnett og fordrøyninganlegg, eller til å undersøke strategier for å redusere overløp/floam og vurdere fremmedvannproblematikk (Rossman, 2015).

### 2.2 Gjennomgang av gjeldene praksis

Dagens praksis for overvannshåndtering og modellering varierer fra kommune til kommune. Programvare for kartlegging, slik som Gemini VA, benyttes av kommunene for oversikt over spillvann-, drikkevann- og overvannsrør. Gemini VA er først og fremst et kartverktøy

for geografisk data og driftsdata. Overvannssystemer som er tegnet i Gemini VA kan ikke direkte benyttes for hydraulisk eller annen funksjonell modellering (Powel, 2020).

Hvordan og hva overvannsmodeller brukes til varierer. Det finnes mange masteroppgaver og studier som omhandler bruk av overvannsmodeller, men få eksempler fra kommuner i Norge. Her presenteres tre eksempler som viser hvordan overvannsmodeller er brukt i praksis, på to steder i Norge og ett i Sør-Korea.

### **Eksempel 1**

En flom- og tiltaksplan ble laget over Norheim i Karmøy kommune, fordi boligområde skulle utvides med 50 prosent (Multiconsult, 2017). En Mike Urban modell for eksisterende overvannsnett skulle kalibreres. For kalibrering og verifisering ble det satt opp to vannføringsmålere, og en nedbørsmåler. For måleperioden på tre måneder ble to nedbørshendelser brukt for kalibrering, og én for verifisering. Modellen ble kalibrert mot de to vannføringsmålerne. En måler var plassert nederst i nedbørsfeltet og målte vannføringen for hele området på 55 hektar. Den andre måleren var plassert lenger oppstrøms, og målte vannføring for et område på åtte hektar. Den kalibrert modellen ble benyttet til anbefaling for flom- og tiltaksplan.

### **Eksempel 2**

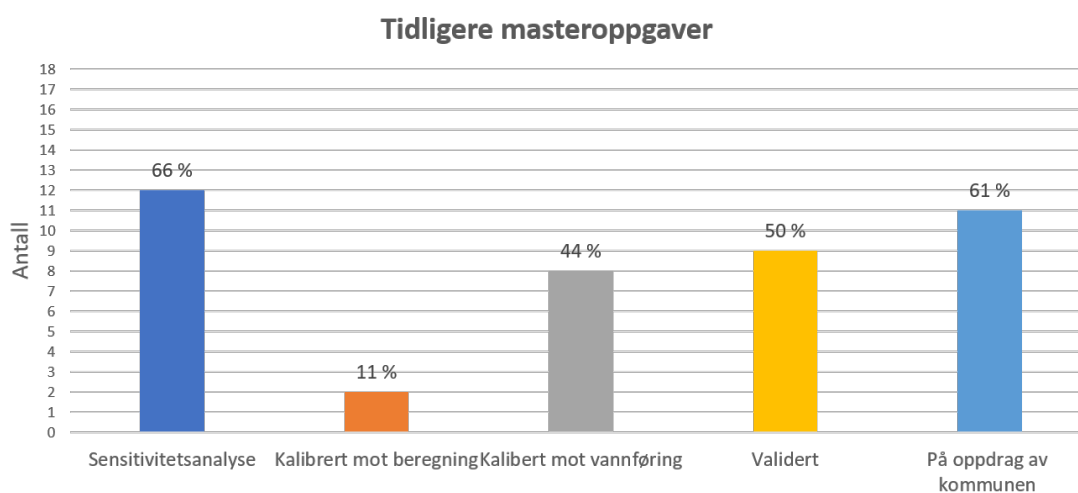
På Hommersåk i Sandnes kommune ble det i sammenheng med en detaljregulering modellert en SWMM modell på 50 hektar (Köz og Sigrist, 2015). Området skulle bygges ut og andelen grønne og naturlig flater ville derfor reduseres. Modellen skulle brukes til riktig dimensjonering for den lokale overvannshåndteringen ved 20 års nedbør, og trygge flomveier for 200 års nedbør. Feltparameterne i modellen ble hentet fra en tidligere kalibrert modell med lignende arealer i Sandnes kommune. SWMM modellen ble ikke kalibrert mot observert vannføring på nettet, og det ble foreslått for videre arbeid å registrere vannføring og korttidsnedbør i området. Modellen ble brukt for blant annet utforming av tverrprofiler av åpen bekk og beregning av fordrøyningsvolum.

### **Eksempel 3**

I 2003 førte en tyfon til intens nedbør over nedbørsfeltet Bisan i Sør-Korea. Store oversvømmelser og ødeleggelser førte til en utredning, hvor man ville forsøke å holde tilbake overvann i en systerne ved intens nedbør (Kim mfl., 2014). Eksisterende overvannsnett ble modellert i EPA SWMM for det 41.89 hektar store nedbørsfeltet. Nedbørsdata og vannføringsdata fra tyfonen i 2003 ble benyttet i kalibrering av modellen. Den kalibrert modellen ble brukt for å dimensjonere vannføring og nødvendig fordrøyningsvolum for et underjordisk fordrøyningsanlegg.

## Masteravhandlinger

Tidligere masteroppgaver benytter ofte overvannssystemer til kapasitetsberegninger, kildesporing eller for å måle tiltakseffekt for LOD-tiltak. Noen av oppgavene kalibreres mot vannføring, og noen kalibreres mot andre teoretiske utregninger. Figur 2.1 har oversikt over 18 tidligere masteroppgaver fra NMBU og NTNU. Mange av oppgavene har hverken kalibrert eller verifisert modellen. Å benytte en modell uten kalibrering eller noen form for verifisering vil øke usikkerheten. Over halvparten av oppgavene har gjennomført sensitivitetsanalyser, og ti av oppgavene kalibrerer modellen. Av de ti kalibrerte modellene kalibreres åtte mot nedbørshendelser med observert vannføring. Det vil si at 56 prosent av oppgavene ble ikke kalibrert mot observert vannføring.



**Figur 2.1:** Statistikk for 18 tidligere masteroppgaver ved NMBU og NTNU.

(Buhler, 2013; Sandstø og Wesche, 2013; Brennhovd, 2014; Haqi, 2015; Moheseen, 2015; Skandsen, 2015; Dalevold, 2016; Dvergsnes, 2016; Aburayya, 2017; Børtveit og Petersen, 2017; Ibrahim, 2017; Mittet, 2017; Parnas, 2018; Zaidan, 2018; Adolfsen, 2019; Hurtig, 2019; Klausen, 2020; Vimalan, 2020)

## 2.3 Oppbygning av modell

Typiske datagrunnlag for modeller er rørdimensjoner og koordinater for rørledninger. Kumkort med retning, innmålte høyder og plassering av hvor ledningene går inn og ut av kummene kan også benyttes. Det finnes en rekke feilkilder som kan oppstå: Det kan være mangel på innmålinger i kummer, manglende rørdimensjon, ukjent rørmateriale og manglende alder. Det kan også være manglende informasjon om antall stikkrenner og påslipp til ledningsnett. Overvannsnett som består av åpne bekker eller kanaler kan mangle tverrsnittsdata og høydeprofiler. For en nedbøravhengig modell vil kjennskap til infiltrasjonskapasitet, grunnvann og innlekking være ønskelig. (Rossman, 2015; NOU:2015:16, 2015)

Grunnleggende metodikk for oppbygning av EPA SWMM modell finnes i brukermanualene utgitt av Amerikanske Environmetnal Protection Agency (EPA). Manualene gjennomgår de ulike funksjonene i SWMM og hvordan de benyttes. Det finnes generelle metoder for oppbygning av modell i disse manualene, men det står lite om fremgangsmåte ved manglende data og om endringer som bør gjøres for importert data. Manualene til EPA beskriver i utgangspunktet modeller som bygges opp fra grunnen av. (Rossman, 2015)

## 2.4 Effektivitetsligning for simulering

For å kalibrere eller verifisere en modell trengs gode metoder for å sammenligne observert og simulert vannføring. For å finne den simuleringen som gir best resultat finnes flere effektivitetsligninger som sammenligner vannføringene. De ulike metodene kan ta for seg standardavvik, lineærkorrelasjon etc. og de sammenligner ofte hvert tidssteg. To av de mest brukte er NSE og KGE. Nash Sutcliffe Efficiency (NSE)(ligning 2.1)(Nash og Sutcliffe, 1970) ble utviklet i 1970, og Kling-Gupta Efficiency (KGE) (ligning 2.2) (Gupta mfl., 2009) ble utviklet i 2009 som en forbedret metode for å gi en verifisering med flere faktorer.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{sim}^t - Q_{obs}^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2.1)$$

Der  $T$  er antallet tidssteg,  $Q_{sim}^t$  den simulerte vannføringen for tiden  $t$ ,  $Q_{obs}^t$  den observerte vannføringen for tiden  $t$  og  $\bar{Q}_{obs}$  gjennomsnittlig observert vannføring.  $NSE = 1$  indikerer perfekt korrelasjon mellom simulert og observert vannføring.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (2.2)$$

Her er  $r$  den lineære korrelasjonen mellom observert og simulert vannføring,  $Q_{obs}$  er standard avviket for observert vannføring og  $Q_{sim}$  er standardavviket for simulert vannføring.  $\mu_{sim}$  er gjennomsnittet for simulert vannføring og  $\mu_{obs}$  er gjennomsnittet for observert.  $KGE = 1$  indikerer perfekt korrelasjon mellom observert og simulert vannføring.

## 2.5 Praksis for kalibrering og verifisering

For å kalibrere en SWMM-modell finnes flere ulike fremgangsmåter. Innhenting av gode felldata som infiltrasjon, ruhet og helning blir i Sangal og Bonema (1994) vektlagt for å få gode simuleringsresultater. Parametermengden som må kalibreres blir i dette tilfellet redusert og modellen blir mer realistisk. De fleste studier anbefaler godt datagrunnlag som en av de viktigste faktorene for en god modell: “*The importance of obtaining good field data cannot be overemphasized. Spending a little extra time to evaluate and select good flow-monitoring sites can save hours of effort during the calibration process*” (Sangal og Bonema, 1994). I studier der presise grunnlagsdata er tilgjengelig blir det færre parametere som må kalibreres. I Kourtis mfl. (2017) blir modellen bare kalibrert mot helning og bredde, de andre parametrene burde da være kjent. I den automatiserte kalibreringen i Temprano mfl. (2006) benyttes elleve parametre som vist i figur 2.1. Fremgangsmåtene som benyttes i kalibrering ligner ofte, både der prosessen er automatisert og der det gjøres manuelt. Forskjellige parameterverdier testes, og den som passer best velges ut. For å definere den beste verdien som skal brukes videre i kalibreringen, sammenlignes data fra observert og simulert vannføring. For Rosa mfl. (2015), og Kourtis mfl. (2017) benyttes NSE for verifisering og kalibrering. Andre effektivitetsligninger som KGE,  $r^2$  og modifisert NSE kan også brukes for dette formålet. Kourtis mfl. (2017) bruker opptil syv effektivitetsligninger for å finne den beste verdien under kalibreringen. Studiene i tabell 2.1 går ikke i detalj gjennom oppbygningen av modellen. Det er derfor usikkert om det er tatt høyde for manglende datagrunnlag i kalibreringen.

**Tabell 2.1:** Studie X1 (Kourtis mfl., 2017), X2 (Sangal og Bonema, 1994), X3 (Rosa mfl., 2015), X4 (Temprano mfl., 2006), X5 (Tsihrintzis og Hamid, 1998), X6 (Arjenaki mfl., 2020) X7 (Kim mfl., 2014) og deres grunnlag for kalibrering og verifisering av SWMM

Studie	Areal (ha)	Tidsoppløsning (min)		Kalibrering			Verifisering	
		Vannføring	Nedbør	Metodikk	Perioder	Parametere	Verifisering	Perioder
X1	245	15	15	Auto	En hendelse	2	Ja	1 hendelse
X2	-	-	ukjent	Auto	12 hendelser	8	Nei	-
X3	1.7 - 2	15	15	Manuell	1. år	8	Ja	ett år
X4	37.3	5	5	Auto	-	11	ja	2 hendelser
X5	5.97 - 23.57	10	10	Manuell	9, 13, 16, 20	8	ja	17 hendelser
X6	4756.23	< 30	< 30	-	To hendelser	6	ja	-
X7	41.89	< 60	< 30	Manuell	En hendelse	8	-	-

I Sangal og Bonema (1994) blir en kalibreringsmetodikk gjennomgått. Volumberegninger blir kalibrert ved justering av andel tette flater (impermeable flater) slik at vannmengden fra simuleringen stemmer med den observerte. For å kalibrere for volum fra avrenning kun fra impermeable flater, benyttes nedbørshendelser som ikke er store nok til å gi avrenning fra permeable flater. Modellen blir deretter kalibrert mot feltets responstid

og toppunkt (maksimal vannføring) for de samme hendelsene. I siste steg blir modellen kalibrert for avrenningsvolum fra de permeable flatene ved større nedbørshendelser og til slutt eventuell finjustering. Det er verdt å merke seg at denne kalibreringsmetodikken som benyttes for åtte parametre i Sangal og Bonema (1994), ikke vil fungere for modellen i Kourtis mfl. (2017), som kun endrer helning og bredde i kalibreringen. Modeller kan kalibreres mot nedbørhendelser eller hele måleperioder. Hvilken periode Temprano mfl. (2006) kalibrerer mot er ukjent, men Rosa mfl. (2015) kalibrerer med en kontinuerlig vannføring over en periode på et år, og resten av studiene i tabell 2.1 kalibrerer for en eller flere nedbørshendelser.

**Tabell 2.2:** Noen av parametre som tidligere studier har kalibrert for: Studie X1 (Kourtis mfl., 2017), X2 (Sangal og Bonema, 1994), X3 (Rosa mfl., 2015), X4 (Temprano mfl., 2006), X5 (Tsihrintzis og Hamid, 1998) X6 (Arjenaki mfl., 2020) og X7 (Kim mfl., 2014)

Parameter	Referanse
Bredde ( <i>width</i> )	X1, X2, X3, X4, X6
Helning ( <i>slope</i> )	X1, X2, X4
Andel impermeable flater	X2, X4
Imp. gropmagasinering ( <i>D-store</i> )	X2, X3, X5, X6, X7
Per. gropmagasinering ( <i>D-store</i> )	X2, X3, X5, X6, X7
Imp. mannings koeffisient	X2, X3, X4, X5, X6, X7
Per. mannings koeffisient	X3, X4, X5, X6, X7
Kanal ruhet	X2
Mannings koeffisient rørruhet	X2, X3, X4, X5, X7
Infiltrasjon	X2, X3, X4, X5, X7



## 3. Metode

EPA SWMM kan brukes for å beregne avrenning fra overflater og vanngjennomstrømning i rør og kanaler. Grunnlagsdata for ønskede områder kan importeres inn i SWMM for videre redigering. SWMM brukes til hydrologiske-, hydrauliske- og vannkvalitetssimuleringer. Modellen håndterer flere typer infiltrasjonsmetoder og kan kjøre simuleringer for ulike nedbørshendelser eller hele perioder. Resultater fra en SWMM analyse gir blant annet simulerte verdier for vannføring, vannhøyde, trykk, og hastighet. Resultater for de ulike komponentene hentes ut i graf- eller tabellformat. For oppbygning av modeller må det velges parameterverdier, samt hvilke metoder og funksjoner som skal benyttes i modellsimuleringen. Nedbørshendelser og tidssteg for beregninger og rapportering må også bestemmes for å kjøre modellen. Parameterverdier, nedbør, metoder og funksjoner bør baseres på datagrunnlag og undersøkelser, men kan også tilnærmes gjennom litteratur.

### 3.1 Case-området

Case-området er et nedbørsfelt i Nordre Follo kommune, med drenering til Skredderstubekken og har en utstrekning på 1.16 kvadratkilometer. Området er 71 prosent urbant, men har mange grøntarealer og noen små skogsområder (Vedlegg A). Skredderstubekken renner ut i Kolbotnvannet gjennom dykket utløp. Kolbotnvannet har dårlig vannkvalitet og kommunen ønsker en overvannsmodell for å gjennomføre analyse av forurensningstilførslene ved ulike nedbørshendelser. Det er satt ut en multi-målesensor i en kum som måler nitrat og vannhøyde kontinuerlig, med fem minutters rapporteringsintervall. Det er vannføringen gjennom denne målekummen som er det observerte kalibreringsgrunnlaget.

I forbindelse med utvikling av metodikken, er det flere utfordringer med området: Overvannsnettets har store variasjoner i helning og dimensjoner. Vannkvaliteten er dårlig, og det kan være behov for etterprøving og verifisering mot nitratmålingene til målekummen. Kombinasjonen av overvannsførende ledninger og kanaler gir en sammensatt modell med ulike variabler/egenskaper. Eldre overvannsrør som kan være utette, og vannledninger med lekkasje kan gi økt usikkerhet. Modellen for området må vurderes for mange utfordringer som er vanlige for overvannsnett og metodikken vil derfor spenne over mange

ulike problemstillinger.

### 3.1.1 Grunnlagsdata

Grunnlagsdata for eksisterende ledningsnett er hentet fra Gemini VA og importert i SWMM. Datagrunnlaget for ledninger og kummer kommer i sin helhet fra Gemini VA. Modellen hadde mange feilkoblinger, motfall, punkter som var lagret dobbelt og generelle mangler på innmålte høyder for kummer. Første del av modelleringen var å sammenkoble ledningene og skape fall mot målekummen og nedbørsfeltets utløp. Prosessen med å finne feilkoblingene og de doble kummene ble gjennomført i startfasen av oppgaven, men flere feilkoblinger ble funnet og utbedret først da nedbørhendelser ble simulert i modellen.

**Tabell 3.1:** Komponentene i SWMM modellen.

Areal	1.16 km <sup>2</sup>
Delfelt	208 stk.
Rørstreknings	341 stk.
Total lengde ledningsnett	15018 meter
Kummer( <i>junctions</i> )	343 stk.
Kummer uten innmålt høyde	179 stk.

### 3.1.2 Kummer og rørledninger

For overvannskummer (*junctions*) uten innmålt høyde ble *invert elevation* (høyden) interpolert mellom kjente punkter og dybden ned til ledningen ble hentet fra terrenghøyde. Der interpoleringshøyden ligger høyere en terrenghøyden ble kumhøyden senket. Flere kummer var generert dobbelt. Disse duplikatene ble slettet og rørledningene førtes gjennom det gjenværende punktet. Noen innmålte kummer gav motfall for rørstreknings. I modellen ble høydene da endret slik at det alltid ble fall på minimum 0.1 prosent mot utløpet. For ledningstrekkene som i modellen ikke var sammenkoblet måtte *inlet* (innløpspunkt) og *outlet* (utløpspunkt) legges inn. I strekningene der det var registrert vannstrømning i feil retning ble *inlet* og *outlet* byttet om. Ved manglende sammenkobling mellom to rørgrener ble et nytt punkt (*junction*) lagt inn der rørgrenene krysser, og de eksisterende rørene ble koblet mot dette punktet. Høydene for innløp og utløp i kummer fantes ikke i datagrunnlaget og er satt til null. Vannet i kummen blir derfor ikke høyere enn i rørledningene, og volum i kummene blir tilnærmet lik null når rørene ikke går fulle.

### 3.1.3 Streknings med åpen bekk

Det er fem streknings i modellen der vannet går i åpen bekk. Det ble generert individuelle tverrsnitt for hver strekning. Tverrsnitt genereres fra høydeprofilen på tvers av bekken

som hentes fra “høydedata.no” (Kartverket, 2014). En av strekningene går i et kunstig opparbeidet bekkeløp (figur 3.1a). Et innmålt tverrsnittet ble brukt for den oppbygde bekken. Oppstrøms det oppbygde bekkeløpet er et overløp som leder vannet ned i et 600 millimeter rør, ved høy vannføring.



(a) Opparbeidet bekkeløp.

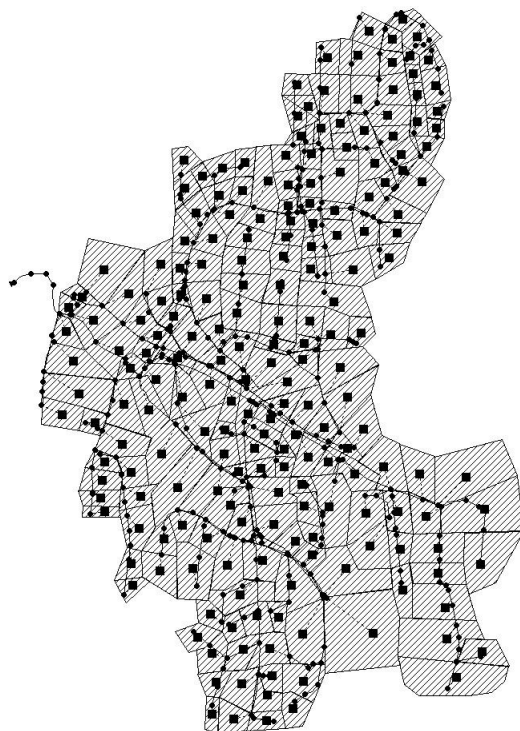
(b) Bekken renner videre gjennom et 300 millimeter dykket rør ved overløpet.

**Figur 3.1:** Strekning med opparbeidet bekk, og overløp.

Tverrsnittene ble lagt inn i modulen *tranquil* i SWMM og tverrsnittet satt inn som irregulært. Manningsverdien (ruhet) for bunn og sidekanter av bekkeløpet ble generalisert til samme verdi for enklere endring under kalibrering. Ruheten ble også satt likt for alle tverrsnittene for bekkene. Det ble ikke benyttet inn- eller utløpsfaktor for når strekningene går inn i kum. Overløpet ble modellert ved å øke innløpshøyden i kummen for overløpsrøret.

### 3.1.4 Nedbørfelt og delnedbørfelt

Nedbørfeltet til Skredderstubekken ble inndelt i flere delfelt. Delfeltene ble tegnet opp i SWMM, og et bakgrunnsbilde (backdrop) med vannstrømning for overflaten ble brukt for å avgrense og skille de ulike feltene. Kart over vannstrømning i nedbørfeltet ble generert i programmet SCALGO. For å endre koordinatsystem fra UTM 33N til koordinatsystemet i SWMM ble bakgrunnsbildet rotert 4.81 grader, og koordinatene til hjørnepunkter ble beregnet. Delfeltene er tegnet opp med hensyn til ledningsnett og vannstrømning, noen av delfeltene blir derfor større enn andre. Størrelsen på feltene blir mindre i områder med mange kummer som fungerer som innløpspunkter.



**Figur 3.2:** Delfelt av det totale nedbørsfeltet i SWMM.

Regler for inndeling av delfelt:

- Alle endepunkter på ledningen skal være utløp for nedbørsfelt.
- En node/kum kan bare være utløp for ett nedbørsfelt.
- Feltene deles inn i grupper med tilsvarende impermeabilitet.

Areal, helning og bredde ble målt og skal derfor ikke kalibreres. Arealene genereres når delfeltene tegnes. Breddene ble målt for vært delfelt og måles på tvers av retningen til vannstrømningen i feltet. Helning ble hentet fra høydedata der differansen mellom høyeste og laveste punkt i feltet ble dividert på lengden. Gjennomsnittshelningen som ble målt for delfeltene ble sammenlignet med gjennomsnittshelningen på 4.1 prosent hentet fra NVE sin *Nedbørsfelt Vannføring INdeks Analyse* NEVINA (Vedlegg A). For å oppnå lik gjennomsnittlig helning som den fra NEVINA ble delfeltenes helning redusert med 56 prosent. Store lokale høydeforskjeller gav stor forskjell for de målte helningene for delfeltene og gjennomsnittshelningen fra NEVINA.

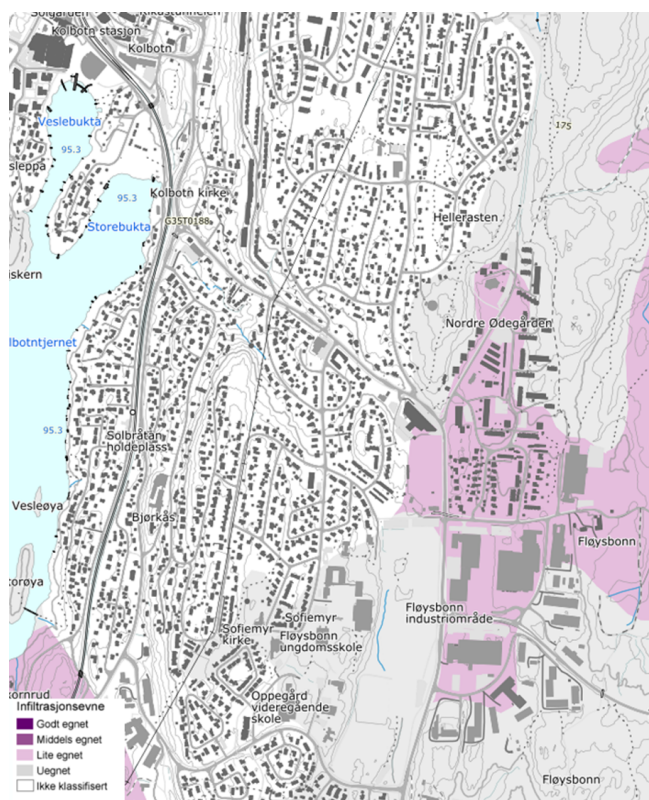
### 3.1.5 Initialverdier

Initialverdiene som ble brukt for de ulike parameterene er ikke stedeagne for nedbørsfeltet og er hentet fra litteratur. Verdier for manningstall, gropmagasinering etc. er satt til middelverdier av grenseverdiene for disse parameterne (figur 3.4). Andel impermeable flater er bestemt ved enkle arealberegninger for noen av delfeltene. Feltene ble deretter

fordelt i fire kategorier som gjenspeiler andel impermeabelt areal. Initialverdiene som ble bestemt er oppsummert i tabell 3.2. Gjennomsnittlig fordampning for perioden ble satt til 3.5 millimeter per døgn. Fordampningen vil i tørrværperioder tømme oppsamlet vann fra gropmagasinene.

## Infiltrasjon

Infiltrasjonsverdiene som er brukt er for leirholdig jord som ikke har god infiltrasjonskapasitet. Infiltrasjonskapasiteten er begrunnet i infiltrasjonskartet vist i figur 3.3 (NGU, 2020), men det mangler oversikt over større deler av nedbørsfeltet. Gjennomgående for områdene med oppdatert kartinformasjon viser at infiltrasjonskapasiteten i området er dårlig. Det antas at områdene med manglende kartinformasjon ikke har bedre infiltrasjonskapasitet.



Figur 3.3: Kart over infiltrasjonkapasitet i området (NGU, 2020).

**Tabell 3.2:** Initialverdier for SWMM modellen.

Variabler	Enhet	Initialverdi	Referanse
Impermeabelt areal	(%)	6, 12, 17 og 35	Beregnet
Imp. gropmagasinering (D-store)	(mm)	1.75	(Rossman, 2015)
Per. gropmagasinering (D-store)	(mm)	5.1	(Rossman, 2015)
Imp. mannings koeffisient	(s/[m <sup>1/3</sup> ])	0.033	(Rossman, 2015)
Per. mannings koeffisient	(s/[m <sup>1/3</sup> ])	0.41	(Rossman, 2015)
Imp. areal uten gropmagasinering	(%)	12.5	(Rossman, 2015)
Mannings koeffisient rørruhet	(s/[m <sup>1/3</sup> ])	0.016	(Rossman, 2015)

### 3.1.6 Grunnvann og innlekking

Grunnvannsberegninger er ikke lagt inn i modellen. Manglende grunnundersøkelser om jordtyper, grunnvannstand og andre geologiske faktorer gjør arbeidet usikkert og det antas at arbeidet vil bli vanskelig og tidkrevende. Det vil også føre til flere parametere som modellen må kalibreres for. Andre muligheter for å simulere vanntilførsel fra grunnvann i modellen er basisstrømning (*base flow*) eller Rainfall Derived Infiltration and Inflow (RDII). RDII er et verktøy som gir nedbørvhengig innlekking i modellen, og kan brukes for å gjenspeile den trege responsen i nettet. Modellen blir i utgangspunktet ikke satt opp med basisstrømning eller innlekking i modellen.

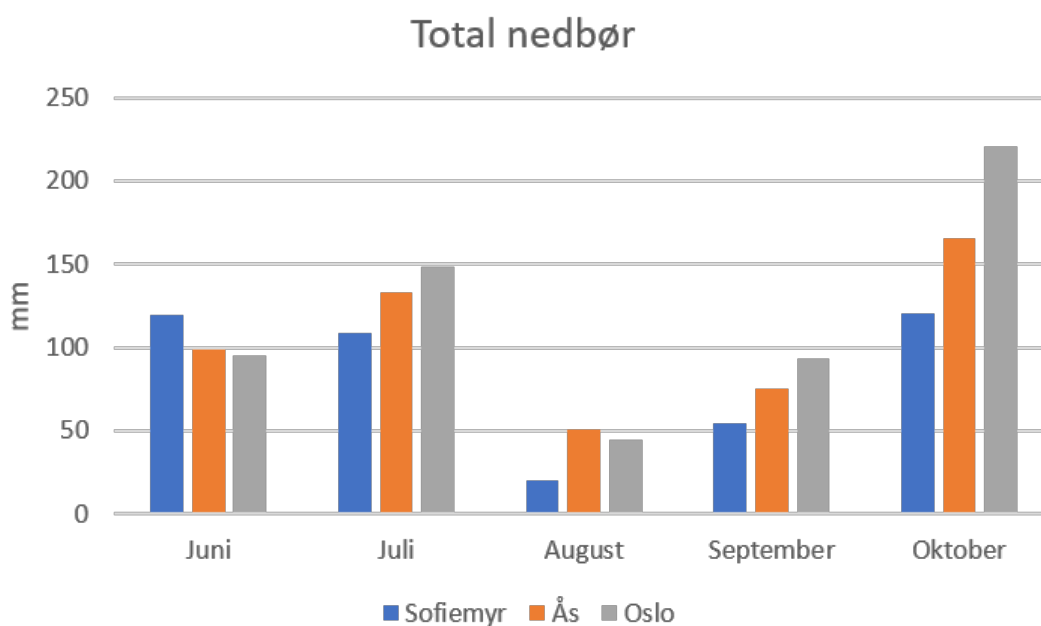
## 3.2 Måledata

### 3.2.1 Nedbør

I nedbørsfeltet har kommunen egen nedbørsmåler som har målt nedbøren som blir brukt i oppgaven. Nedbørsdata fra den lokale måleren ble vurdert opp mot nedbørdata fra Ås og Oslo som er hentet fra “klimaservicesenter.no”. Nedbør og målt vannføring ble sammenlignet og nedbøren måtte forskyves to timer fra 03.juni til 18.juli og tilbake en time etter 18.juli. Dette skyldes en feil i tidsverdien til nedbørsdataen og forskjell på vinter- og sommertid mellom målt vannføring og nedbør. Nedbørsdataene for perioden juni-oktober 2020 ble behandlet i Excel og endret til en dataserie med minutt oppløsning. Dataserien ble lagret som filtype “.dat” som kan importeres til SWMM. Nedbøren legges inn som *cumulativ* i SWMM, det vil si målte verdier per tidsenhet.

I utgangspunktet skulle nedbørstasjonene i Ås og Oslo benyttes. Nedbøren fra disse stasjonene kunne interpoleres med hensyn på avstanden til nedbørsfeltet. Sammenligningen av data fra nedbørmålerne viser at det er stor variasjon i nedbørsintensitet, selv om de fleste hendelser treffer alle tre målestasjonene. Nedbørsfeltet er totalt litt over én km<sup>2</sup> og

nedbørstasjonen i Oslo ligger fem kilometer unna. Figur 3.4 viser at målestasjonen i Oslo registrerte nesten dobbelt så mye regn som den på Sofiemyr for september og oktober. Dette viser at det er store forskjeller i målt nedbør, og at lokale målere er viktige for korrekt datagrunnlag. Intense og kortvarige nedbørshendelser bør ikke benyttes hvis avstanden til nedbørsmålere er for stor. Hvis det finnes flere nedbørsmålere i feltet kan nedbørshendelser som gir likt utslag på målerne fungere godt for kalibrering/verifisering. For nedbørsfelt uten lokale nedbørsmålere bør anskaffes av dette vurderes for å redusere usikkerhet.



**Figur 3.4:** Nedbør i måleperioden for de ulike stasjonene.

Sammenligning av nedbør fra Sofiemyr og observert vannføring, viser at nedbøren samsvarer godt med responsen til vannføringen. Mengden nedbør kan likevel variere lokalt, selv om det registreres nedbør for samme tidspunkt. Nedbørshendelsene som ble plukket ut for kalibrering er de største nedbørshendelsene for måleperioden. Det ble ikke lagt mye vekt på tørrperioder i forkant av hendelsene, noe som kan være avgjørende for kalibreringen. Sangal og Bonema (1994) valgte ut nedbørshendelser som ikke førte til avrenning fra permeable flater for kalibreringen. Lange måleperioder er viktig for å kunne plukke ut nedbørsperioder som er gode for kalibrering. Tsihrintzis og Hamid (1998) bruker ti hendelser til kalibreringen, utvalgt fra en måleperiode på ti år. En måleperiode på ti år var nok til at (Tsihrintzis og Hamid, 1998) kunne finne 17 hendelser for å verifisere modellen. Det ville derfor vært gunstig med en lengre måleperiode, slik at flere typer nedbørshendelser var tilgjengelig for kalibrering. Når flere hendelser ikke er tilgjengelig, velges hendelsene som gir mest avrenning.

Tidsoppløsningen for nedbørsdata har sammenheng med intensiteten. Større tidsintervaller gir lavere intensitet og nøyaktighet. Vannføringen vil med grov tidsoppløsning simuleres med lavere toppunkt. For å simulere de høyeste vannføringstoppene bør tidsintervallene for særlig mindre nedbørsfelt være korte. For større nedbørsfelt vil konsentrasjonstiden være større, og det tar lengre tid for nedbør som faller øverst i feltet å renne ned til målepunktet. Behovet for korte tidsintervaller for større nedbørsfelt er derfor ikke like stort, men det har ingen åpenbare negative effekter for modellen. Tidsintervallene for simulering av modellen benytter laveste målte intervaller på fem minutter.

### 3.2.2 Vannføringsdata

Multi-målesensoren som er plassert nederst i Skredderstubekken blir driftet av NVE. Omgjøringsfaktor fra vannhøyde som måles, til vannføring som modellen kalibreres mot er bestemt etter NVE's innsamlede data og beregninger (Kvernhaugen, 2020). Måledata fra sensoren lastes automatisk opp til *Sildre* som gir fri tilgang på måledata. Sildre er en nettside med oversikt over hydrologiske målestasjoner og måledata i Norge (NVE, 2020).

**Tabell 3.3:** Omregning fra høyde til vannføring for tverrsnittet i målekum (Kvernhaugen, 2020).

Høyde $h$ (m)	Vannføring (l/s)
$h < 0.045$	$Q = 850 \times h^{1.5}$
$0.045 < h < 0.06$	$Q = 1000 \times h^{1.5}$
$0.06 < h < 0.27$	$Q = 1200 \times h^{1.5}$
$h > 0.27$	$Q = 200$

Observert vannføringen er en av de større usikkerhetene for modellen. NVE har gjort målinger ved større vannføring, som indikerer at målekummen har en maksimal kapasitet på omkring 200 liter i sekundet. For høyden 0.27 meter i målekummen ble vannføringen målt til 203 liter i sekundet og høyder over 0.27 meter vil føre til oppstuvning og gir ikke økt vannføring. For den observerte vannføringen legges det derfor inn en kapasitetsbegrensning på 200 liter i sekundet for høyder over 0.27 meter. Begrensingen er ikke lagt inn i modellen og simulert vannføring vil derfor kunne overstige 200 liter i sekundet. Valget om å ikke modellere målekummen er begrunnet i komplisert utforming og lite datagrunnlag for rørsystemet oppstrøms målekummen under jernbane og vei. Utløpet er dykket i Kolbotnvannet, og som konsekvens av dette kan det oppstå sug ut av kummen når røret fylles opp, dette kan også være vanskelig å gjenskape i modellen.





**Figur 3.5:** Målekum med tverrsnitt.

I overvannsnettet er det observert en basisstrømning (*base flow*) som kan bestemmes etter lengre tørrperioder. Årsaken til basisstrømningen er usikker, men kan skyldes lekkasje fra vannforsyning, feilkoblinger av spillvannledninger eller innlekking fra utstrømningsområder for grunnvann. Vannmåleren fanger også opp små høydeforskjeller som kommer i intervaller, dette skyldes en pumpekum øverst i nettet, i et myrområde, som fylles av grunnvann også ved tørrperioder. Det er ikke forsøkt å simulere denne frekvensen i modellen.

## 3.3 Kalibrering og verifisering

### 3.3.1 Sensitivitetsanalyse

Sensitivitetsanalyse blir brukt for å finne hvilken påvirkning de ulike kalibreringsparametrene i SWMM har for volum og toppunkt. Endringene blir gjort for én parameter av gangen og i en modell med initialverdier for parameterne som ikke testes. Minimums- og maksimumsverdier i figur 3.4 blir brukt som ytterpunkter. Analysen ble gjennomført over to hendelser, og danner grunnlaget for hvilken rekkefølge parameterne skal kalibreres. Sensitiviteten parameterene utgjør for den simulerte vannføringen beregnes ved formel 3.1 (Lee mfl., 2017)

$$\text{Sensitivitet} = (\Delta MR / MR) / (\Delta p / p) \quad (3.1)$$

Hvor  $MR$  = simulering med initialverdier;  $\Delta MR$  = forskjellen mellom  $MR$  og simuleringen med endret parameterverdi;  $p$  = parameterverdi; og  $\Delta p$  = endring i parameter.

### 3.3.2 Kalibreringsmetode

Modellen simulerer avrenning fra 03. juni til 25. oktober 2020, og 19 nedbørshendelser plukkes ut for kalibreringen. Når modellen kalibreres for en parameter er det valgt å kjøre ti simuleringer med ulike parameterverdier, og parameterverdien med det beste simuleringresultatet brukes videre i kalibreringen. Effektivitetsligninger KGE (ligning 2.2), NSE (ligning 2.1) og volumavvik benyttes for å velge ut den beste simuleringen under kalibreringen. For noen parametere må de visuelle egenskapene til grafene vurderes, der det skjønnsmessig blir feil å kun bruke beste tallverdier fra effektivitetsligningene som indikator. Valgt verdi for parameter tilføyes modellen og neste parameter testes for ti ulike verdier.

For å finne den beste simuleringverdien av de ti simuleringresultatene blir grafer, volumavvik, NSE og KGE fremstilt i Excel for hver av de 19 nedbørshendelsene. Modellen kalibreres ikke mot areal, bredde og helning, som er parametere som er beregnet eller målt. Verdiene som modellen skal kalibreres for er verdivariasjonen mellom minimum- og maksimumsverdier funnet i litteratur og som er beskrevet i tabell 3.4.

**Tabell 3.4:** Minimum og maksimum verdier som brukes for kalibrering og sensitivitetsanalyse.

Variabler	Enhet	Min - maks	Referanse
Areal (area)	(ha)	0.14 - 3.30	Beregnet
Bredde (width)	(m)	25 - 182	Målt
Helning (slope)	(%)	0.16 - 13.64	Målt
Impermeabelt areal	(%)	4.0 - 45.0	Beregnet
Imp. gropmagasinering (D-store)	(mm)	0.3 - 2.5	(Rossman, 2015)
Per. gropmagasinering (D-store)	(mm)	2.5 - 5.1	(Rossman, 2015)
Imp. mannings koeffisient	(s/[m <sup>1/3</sup> ])	0.011 - 0.033	(Rossman, 2015)
Per. mannings koeffisient	(s/[m <sup>1/3</sup> ])	0.02 - 0.8	(Rossman, 2015)
Imp. areal uten gropmagasinering	(%)	5 - 20	(Rossman, 2015)
Mannings koeffisient rørruhet	(s/[m <sup>1/3</sup> ])	0.010 - 0.022	(Rossman, 2015)
Hydraulisk Konduktivitet	(mm/t)	0.3 - 1.5	(Rawls mfl., 1983)
Suction	(mm)	208.8 - 292.2	(Rawls mfl., 1983)
Porøsitet	fraction	0.309 - 0.432	(Rawls mfl., 1983)

### 3.3.3 Verifisering

Verifisering av modellen er gjort med hensyn på volum, KGE og NSE. To større nedbørshendelser som ikke er brukt i kalibreringen simuleres i den kalibrerte modellen. Resultatene kan sammenlignes med resultatene fra de kalibrerte nedbørshendelsene. Det er ingen fasit på hva som er en godt verifisert modell, og det må vurderes mot formålet med modellen. Gode volum, NSE og KGE verdier for nedbørshendelser betyr ikke eksplisitt at modellen er god, og det er viktig med vurderinger av modellen som helhet.

## 3.4 Utvikling av metodikk for modell-oppbygning, kalibrering og verifisering

En god metodikk for modell-oppbygning, kalibrering og verifisering kan være et godt verktøy. For å finne flere alternative fremgangsmåter, testes den kalibrerte modellen for generalisering av feltbredde, helning og impermeabilitet. Dette vil gi en indikator på hvor det er mulig å forenkle uten å øke usikkerheten i modellen. Metodikken skrives punktvis i tabellform og beskriver modellbygging, sensitivitetsanalyse, kalibrering og verifisering. For noen punkter der manglende datagrunnlag er vanlig vil flere metoder/fremgangsmåter presenteres. Metodikken vil gi anbefalinger for beste fremgangsmåte, men også beskrive generaliseringer som fungerte for case-området. For alle punktene i metodikken kommenteres de viktigste parameterene, og hvilken effekt generaliseringen har på den ferdige modellen. Fremgangsmåtene skal redegjøres slik at informative valg kan tas av modellbyggeren.



## 4. Resultater og diskusjon

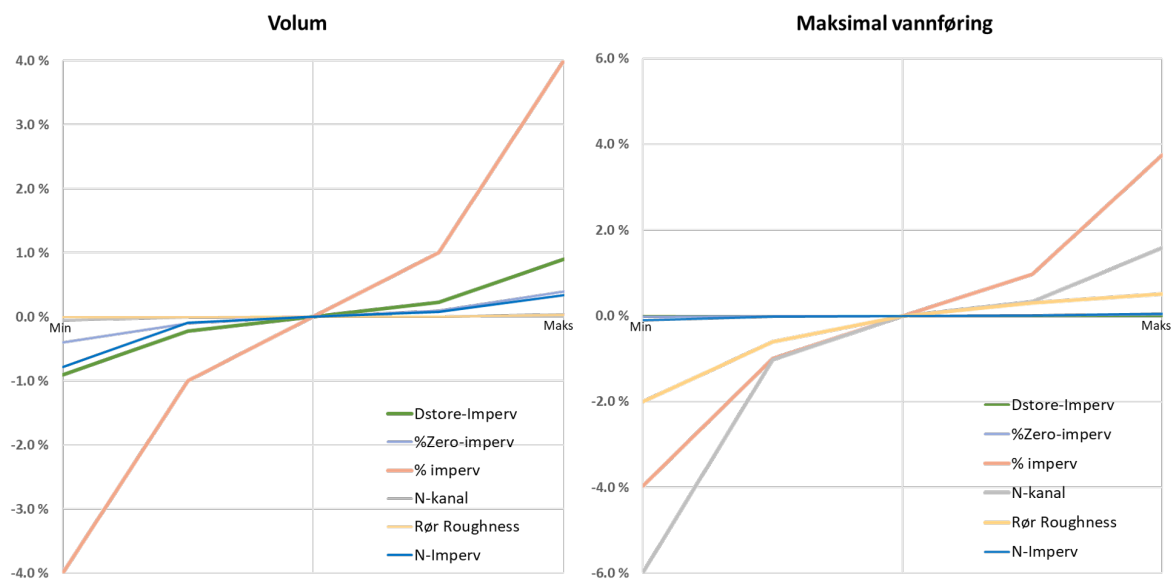
Under modelloppbyggingen ble mange kummer og rørledninger justert. Terreng høyde og interpolering ble brukt der kumhøyder og noen innmålte strekninger ble endret for å få fall. Det vil være en tidkrevende prosess med innmålinger og rørinspeksjon, for å etterprøve hvilken betydning disse endringene har hatt for modellen. Verifisering av modellen kan være en indikator for om modellen fungerer godt, selv med mangler i grunnlagsdata. Arbeidet med å legge inn helning og bredde for alle delfeltene tar tid når prosessen gjøres manuelt. Simulering med generalisering brukes for å finne effekten forenklinger har på modellen. Metodikken som består av individuelle endringer av delfeltene er tidkrevende. Det vil derfor være tidsbesparende å generalisere, men det vil kunne redusere nøyaktigheten til modellen. Resultatene og erfaringene fra arbeidet med modellen brukes for å diskutere og anbefale strategier for metodikken som skal lages for modelloppbygging, kalibrering og verifisering.

### 4.1 Kalibrering

Kalibreringsprosessen har vært tidkrevende, og det ble i kalibreringsprosessen mye dobbelt arbeid da nye parametre måtte bestemmes, og som endret premisset for de første kalibreringsvalgene. Det er i løpet av den totale kalibreringsprosessen gjennomført over 500 simuleringer med ulike verdier. Ti modeller kjørt da samtidig for ti ulike parameterverdier. Simulert vannføring ble rapportert hvert femte minutt, og ble direkte sammenlignet med den observerte vannføringen. For simuleringene ble *Routing Step* på ti sekunder benyttet. Det ble forsøkt å simulere med høyere *Routing Step* for å redusere simuleringstiden, men resultatene ble ikke brukbare. Det er normalt å bruke korte tidsintervaller når *Dynamic Wave* benyttes (Rossman, 2015). Hver parameter ble for den ferdig kalibrerte modellen bare testet en gang. Det er usikkert på hvor mye som kan hentes ved flere gjennomkjøringer, og selv med en liten forbedring for hver gjennomkjøring vil til slutt usikkerhetene bli større enn gevinsten for videre kalibrering. Det kan være gunstig å gjennomføre flere simuleringssunder hvis parameterverdiene endres mye fra initialverdiene.

### 4.1.1 Sensitivitetsanalyse

For sensitivitetsanalysen ble initialverdier brukt som referanse. Noen av verdiene kunne skjønnsmessig vært lavere eller høyere, men det er viktig å benytte den totale verdi-variasjonen for parameteren som skal benyttes i kalibreringen. Hvis en parameter skal kalibreres for minimum- og maksimumsverdier er det naturlig å velge gjennomsnittsverdi som initialverdi. Rækkefølgen for kalibreringen ble bestemt ut ifra sensitiviteten til parameterene. Andel impermeable flater fikk størst betydning for volum i sensitivitetsanalysen og modellen ble derfor først kalibrert for denne parameteren (figur 3.1). Videre ble modellen kalibrert mot ruhet i kanal og rørledninger. Infiltrasjonsparameterne gav i utgangspunktet ikke avrenning, og ble derfor ikke inkludert i analysen.



**Figur 4.1:** Sensitivitetsanalyse for volum og maksimal vannføring.

I Rosa mfl. (2015) ble parameterne endret med  $\pm 50$  prosent istedenfor minimum- og maksimumsverdi som ble brukt i denne oppgaven. En sensitivitetsanalyse med endring på  $\pm 50$  prosent for alle parameterverdier, vil ikke gjenspeile den mulige endringen parameteren kan utgjøre under kalibreringen. Minimum- og maksimumsverdier viser hvor mye en parameter totalt kan endre volum og maksimal vannføring. Hvis en mindre verddivariasjon for en parameter kan bestemmes vil analyse bli mer nøyaktig.

### 4.1.2 Resultater av kalibreringen

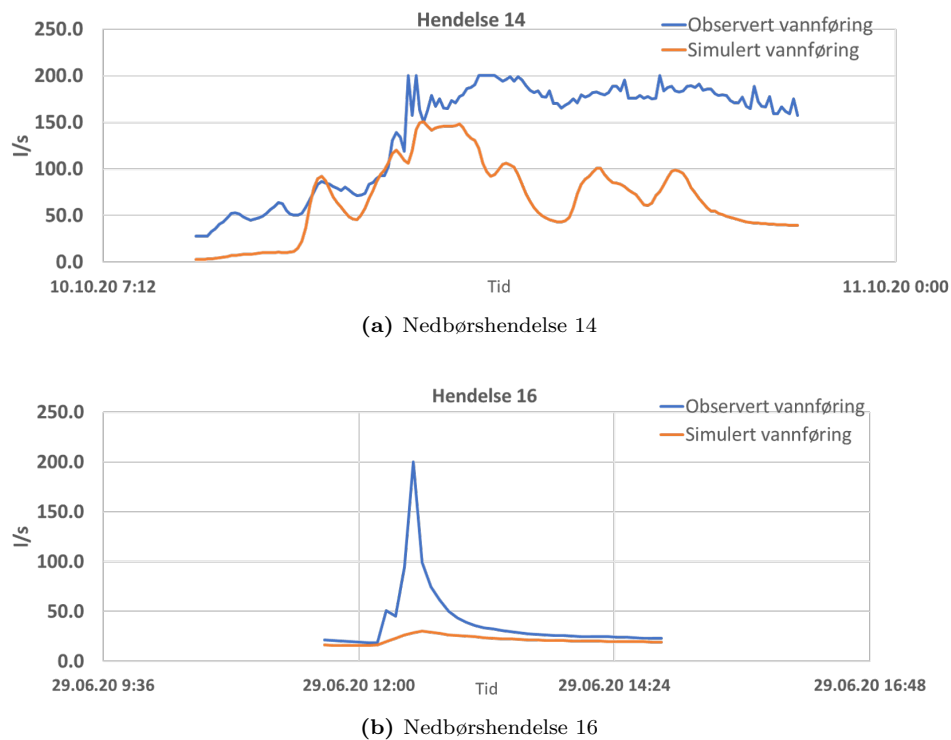
Effektivitetsligningene og volumfaktor for de ulike nedbørshendelsene gav forskjellig indikator for hvilken parameterverdi som skulle velges. En nedbørhendelse kunne simulere for mye vannføring, og en annen kunne simulere for lite, med samme parameterverdi. Den parameterverdien som ble brukt videre i kalibreringen, er den beste snittverdien

for volum, KGE og NSE. For noen parametere måtte grafene vurderes visuelt der det skjønnsmessig ikke ble riktig å følge de andre kriteriene. En årsak til ulike indikatorer for nedbørhendelsene, er trolig variasjon i tørrperioden før hendelsene. KGE, NSE og faktor for volum er vist i tabell 4.1, og viser stor forskjell for de ulike nedbørhendelsene. Å benytte nedbørshendelser med tørrperiode i forkant slik som Sangal og Bonema (1994) gjør, kan gi et større samsvar for hva resultatene indikerer.

**Tabell 4.1:** Beregnet volum, NSE og KGE for kalibrert modell.

Nedbørhendelse	Volum faktor ( $Q_{obs}/Q_{sim}$ )	NSE	KGE
Hendelse 1	0.97	0.78	0.88
Hendelse 2	0.83	0.06	0.54
Hendelse 3	0.96	0.50	0.68
Hendelse 4	0.65	-0.32	0.38
Hendelse 5	0.94	-1.78	-0.40
Hendelse 6	1.54	0.84	0.64
Hendelse 7	2.41	-1.47	0.31
Hendelse 8	1.29	-0.27	0.08
Hendelse 9	1.30	0.63	0.72
Hendelse 10	1.10	0.59	0.71
Hendelse 11	1.39	-0.29	0.58
Hendelse 12	1.46	0.25	0.65
Hendelse 13	2.91	-5.29	0.22
Hendelse 14	2.07	-1.25	0.3
Hendelse 15	1.77	-0.6	0.10
Hendelse 16	1.77	-0.11	-0.03
Hendelse 17	1.22	0.66	0.76
Hendelse 18	1.32	-0.05	0.74
Hendelse 19	1.07	0.75	0.87
Snitt vektet for varighet	1.49	-0.46	0.39

Den kalibrerte modellen er god på enkelthendelser, ved lite nedbør i forkant. Dette kan skyldes at bakken er umettet, og nedbør på permeable flater vil infiltrerer bakken. Figur 4.2 viser nedbørshendelse 14 og 16 der bakken har blitt mettet etter flere nedbørhendelser i forkant, og uten lenger tørrperiode før hendelsene. Den simulerte vannføringen faller da mye raskere enn den observerte når det slutter å regne. Ingen av hendelsene som er brukt i kalibreringen gir betydelig avrenning fra permeable flater. For kalibreringen av permeable flater mangler hendelser der avrenningen fra de permeable flatene utgjør en større del av den totale vannføringen. En måleperiode lenger enn fem måneder ville kunne gi flere hendelser som passer for kalibreringen.



**Figur 4.2:** Nedbørshendelser uten tørrperiode fører til at observert avrenningen blir større en den simulerte.

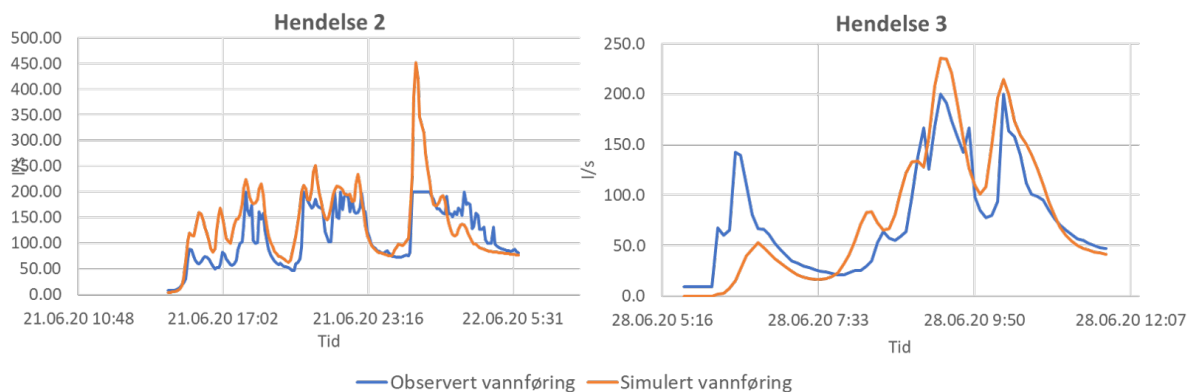
Hvis nedbørshendelsene men kortere tørrperiode i forkant settes til side, får vi en annen gjennomsnittsverdi som vist i tabell 4.2. Det betyr at modellen fungerer bedre for enkeltstående nedbørhendelser. For analyser av overvannsnett benyttes normalt kasseregner eller hyetogram som ikke består av flere hendelser. En modell som fungerer for enkelthendelser kan derfor fungere godt for dette.



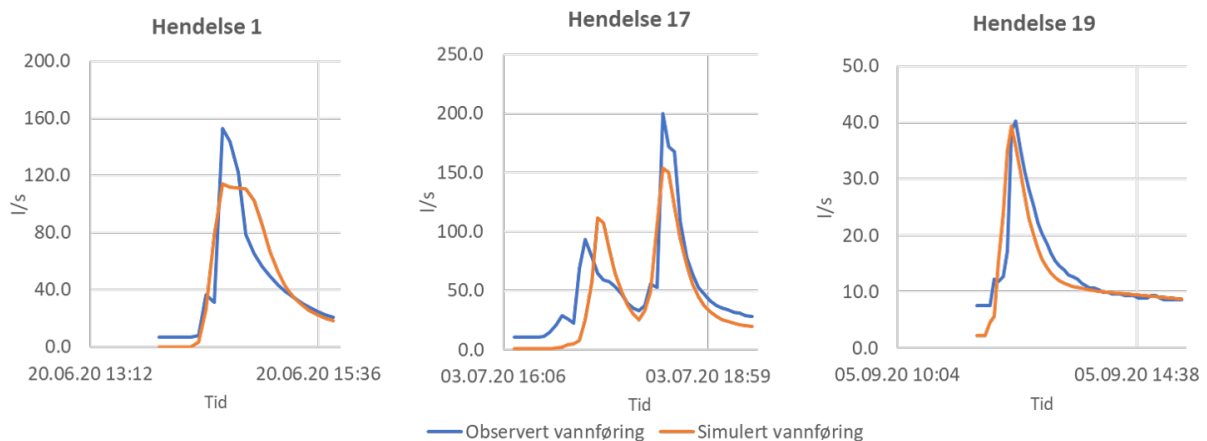
**Tabell 4.2:** Volum, NSE og KGE for nedbørshendelser med lenger tørrperiode i forkant.

Nedbørshendelse	Volum faktor ( $Q_{obs}/Q_{sim}$ )	NSE	KGE
Hendelse 1	0.97	0.78	0.88
Hendelse 2	0.83	0.06	0.54
Hendelse 3	0.96	0.50	0.68
Hendelse 4	0.65	-0.32	0.38
Hendelse 6	1.54	0.84	0.64
Hendelse 8	1.29	-0.27	0.08
Hendelse 9	1.30	0.63	0.72
Hendelse 10	1.10	0.59	0.71
Hendelse 12	1.46	0.25	0.65
Hendelse 17	1.22	0.66	0.76
Hendelse 19	1.07	0.75	0.87
Snitt vektet for varighet	1.11	0.38	0.55

For nedbørshendelse 3 i figur 4.3 samsvarer NSE og KGE godt, men har for lav vannføring for det første toppunktet. Simulert vannføring treffer godt for de største vannførings-toppene og totalvolum. For hendelse 2 simuleres en maksimalvannføring på 450 liter i sekundet. Begrensningen i målekummen på 200 liter i sekundet blir derfor utslagsgivende for at NSE verdien er så lav. Hendelse 2 treffer godt for de første toppene og har en KGE på 0.54.

**Figur 4.3:** Simuleringsresultat for nedbørshendelse 2 og 3.

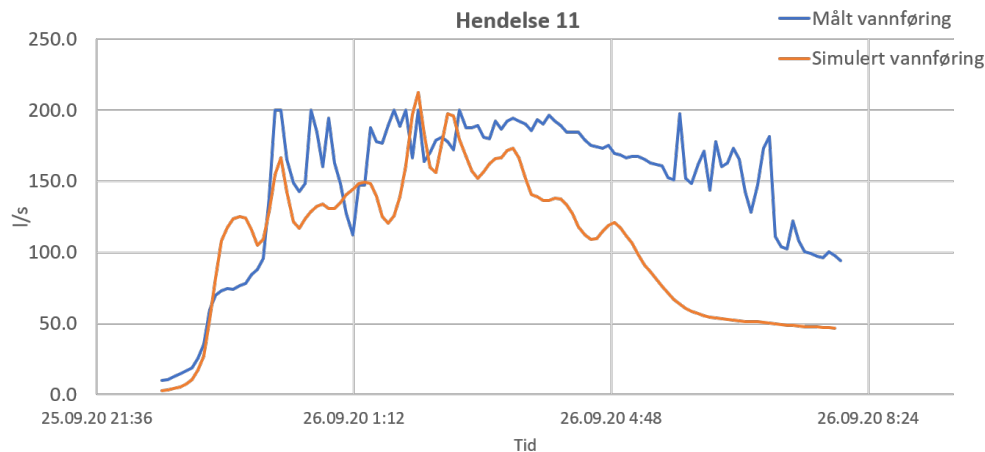
Selv om modellen ikke alltid simulerer alle vannføringstoppene like godt, treffer den bra for enkeltstående nedbørshendelser med tilstrekkelig tørrperiode i forkant. Nedbørshendelse 1, 17 og 19 har tørrperioder i forkant og har høy intensitet. Simuleringen for hendelse 1 og 17 ligger noe lavt for maksimalvannføring.



**Figur 4.4:** Simuleringsresultat for nedbørshendelse 1, 17 og 19.

### 4.1.3 NSE & KGE

Effektivitetsligningene NSE og KGE kan brukes for verifisering av modeller, men fungerer noe ulikt. Verdiene for NSE og KGE kan ikke sammenlignes direkte, selv om begge metodene benytter verdien én som perfekt likhet mellom grafene. For lavere verdier, og da spesielt for verdier under null vil effektivitetsligningene avvike fra hverandre. For kalibreringen ble det lagt mest vekt på KGE for valg av beste parameterverdi. Det viste seg fordelaktig å benytte KGE for å omfavne flere elementer, slik at den riktige verdien ble brukt videre. Det kommer også frem i Knoben mfl. (2019) som sammenligner metodene. En hendelse som treffer bra mot KGE, men som har lav NSE-verdi er nedbørshendelse 14 i figur 4.5. Her gir simuleringen en god volummengde for første halvdel av hendelsen, og treffer godt mot høyeste vannføring. NSE-verdien er -0.27, og KGE gir en verdi på 0.57. Selv med den lave NSE-verdien kan det argumenteres for at simulert vannføring ligger på et akseptabelt nivå. Skjønnsmessig vurdering av grafene kan derfor få en viktig funksjon i kalibreringen der NSE eller KGE ikke gir entydig svar.

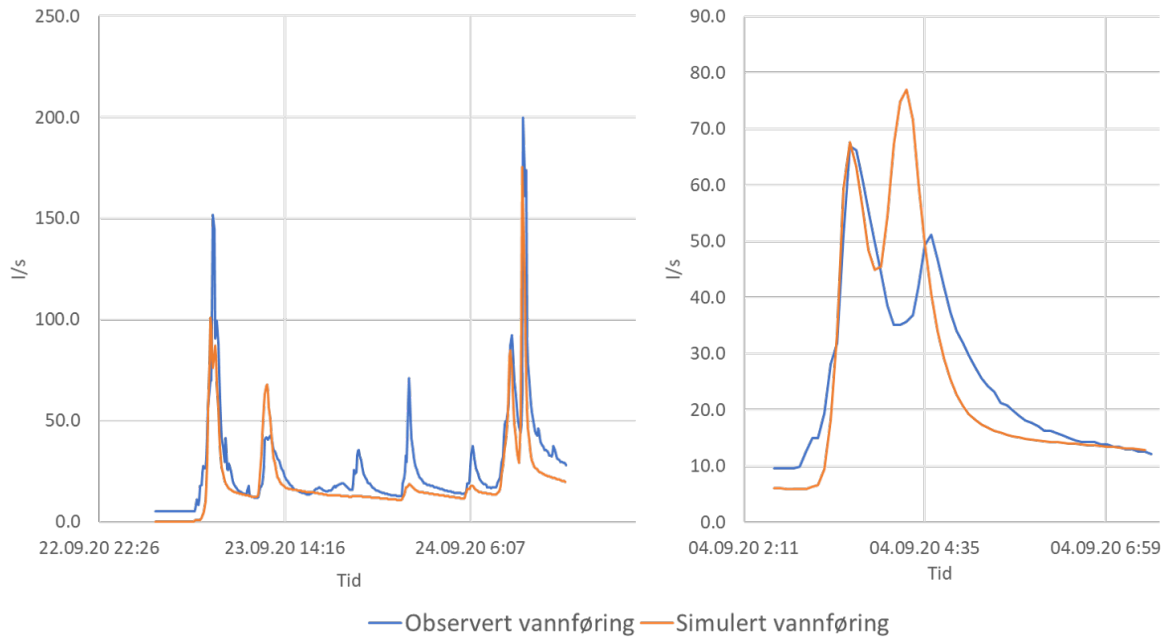


**Figur 4.5:** NSE = -0.29, KGE = 0.58.

Et vendepunkt for å beskrive om modeller er dårlige er når  $NSE \leq 0$ . Dette er ikke tilfellet for KGE. Knoben mfl. (2019) sammenligner effektivitetsligningene og skriver at det for KGE ikke finnes noe iboende vendepunkt. Det konkluderes med at modellbyggeren selv må sette dette vendepunkt for KGE for hvert enkelt tilfelle. KGE er avhengig av flere faktorer, og hvis faktoren for strømningsgjennomsnittet skal brukes som vendepunkt, vil simuleringresultater med KGE større enn -0.41 være akseptabelt (Knoben mfl., 2019).

## 4.2 Verifisering

For verifisering av den kalibrerte modellen ble to nedbørhendelser med tørrperiode i forkant valgt ut. I figur 4.6 går den ene hendelsen over to døgn og den andre over fire timer. For den første hendelsen treffer modellen godt for de større vannføringstoppene, men ikke for alle de mindre vannføringstoppene. For den andre nedbørshendelsen treffer den simulerte vannføringen godt på første vannføringstopp, men for den andre vannføringstoppen ligger simulert vannføring over maksimalvannføringen. Effektivitetsligningene KGE og NSE for de to hendelsene i tabell 4.3 ligger høyere enn gjennomsnittet for kalibreringsresultatet, men lavere enn de høyeste enkeltverdiene.



**Figur 4.6:** Nedbørhendelser for verifisering av kalibrert modell.

**Tabell 4.3:** Volum, NSE og KGE for nedbørshendelsene i verifiseringen.

Hendelse	Volum faktor ( $Q_{obs}/Q_{sim}$ )	NSE	KGE
Snitt kalibrering	1.20	0.36	0.50
Lang hendelse	1.34	0.75	0.69
Kort hendelse	1.03	0.66	0.64

Verifiseringen av en modell kan si noe om hva modellen kan brukes til. En modell som gir gode resultater for simulering av maksimal vannføring, kan brukes for å finne kapasitet på nettet. Den kan også brukes for å se hvordan fordrøyende tiltak påvirker vannføringstoppene. For beregninger av størrelse på fordrøyningsmagasiner, bør modellen stemme godt for volum. For kildesporing bør det totale avrenningsvolumet stemme, og maksimalvannføringen er derfor mindre viktig. Utvelgelse av nedbørhendelser som gir gode simuleringsresultater er viktig for bruken av modellen.

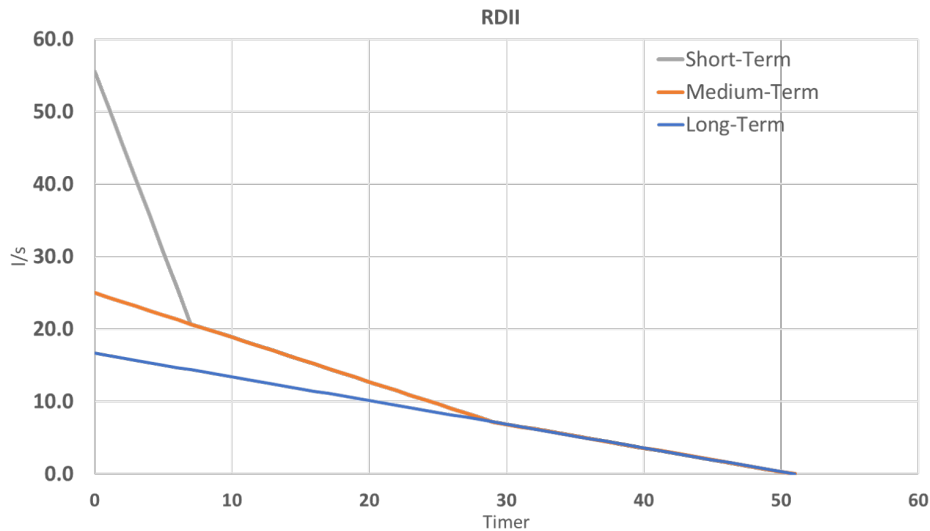
Verifiseringen gir ulike volumfaktorer for de to hendelsene. For verifisering og kalibrering ligger den observerte vannføringen høyere enn den simulerte. I modeller der enkelthendelser brukes for kalibreringen, vil start- og slutt punktet for hendelsene ha mye å si for den totale vannføringen. Modeller som ikke er modellert for grunnvann og basisstrømming vil få mindre total avrenning hvis start- og slutt punktet settes lenge før og etter nedbørhendelsen. Verifisering av en overvannsmodell må i tillegg til volum, KGE og NSE bestå av en vurdering og utredning av hva modellen kan brukes til. Verifiseringen av vannføringen i målekummen sier ikke direkte noe om vannføringen i andre deler av

overvannsnett. Generaliseringer og parametervalg må vurderes for usikkerhet i de ulike delene av overvannsnett. For mye generalisering vil gjøre modellen dårlig egnet for lokale kapasitetsberegninger. En modell som er generalisert og bare verifiseres mot total vannføring, kan i utgangspunktet bare brukes til kapasitetsberegninger for utløp og beregning av fordrøyningsvolum.

## 4.3 Grunnlagsdata for modell over case-området

### RDII - innlekking

*RDII inflow* er en parameter som fikk stor betydning for kalibreringen, og som ble brukt for å simulere en tregere avrenning. Modellen gav lite avrenning fra permeable flater, og reaksjonstiden på nedbørsfeltet ble hovedsakelig avhengig av avrenningen fra de impermeable flatene. Endring av ruhet for nedbørsfeltet og rørledninger kunne endre reaksjonstiden, men den ble enten for treg eller rask. I de observerte vannføringene reagerer nedbørsfeltet raskt, men har også en etterstrømning som varer i mange dager etter nedbørshendlene. For å kunne simulere denne trege responsen ble RDII brukt. Den trege responsen kan skyldes avrenning fra permeable flater som modellen ikke fanger opp, eller innlekking på ledningsnett. Innlekking vil være naturlig i områdene med åpen bekk der avstand til grunnfjell tidvis er veldig lav. Basisstrømning hadde vært mulig å simulere, men det er usikkert hva den kommer av. Mulige årsaker for basisstrømning er grunnvannstrømming, lekkasje fra vannledninger eller feilkoblinger av spillvannledninger. Basisstrømningen er generelt lav i tørreperioder, og vil derfor ha lite å si ved store vannføring. Under kalibreringen ble RDII lagt inn i færre delfelt enn i den ferdig kalibrerte modellen. Dette reduserer tidsbruken for simuleringene. Innlekkingen ble etter kalibrering fordelt i ytterpunkter av modellen, uten at det endret simuleringsresultatet vesentlig. Det gjør også kalibreringen av RDII enklere når bare verdiene i en kum må endres.



**Figur 4.7:** Grafisk fremstilling av hvordan RDII inflow fordeler seg etter nedbør.

RDII kan legges inn med perioder for kort, medium og lang varighet. Figur 4.7 viser utstrekningen i timene etter en nedbørshendelse. For nedbørshendelser som kommer med intervall mindre enn 50 timer vil den tidligere hendelsen fremdeles bidra til noe avrenning. Mengden vann fra RDII vil i stor grad påvirke vannføringen for kort sikt, og aller mest for nedbørshendelser som kommer med mellomrom mindre enn ti timer. Den kortsiktige vannstrømningen fra RDII, gir en tregere responsen for nedbørsfeltet og gav ønsket funksjon for simuleringen. Vannføringen fra urbane områder vil i stor grad komme fra impermeable flater, og det kan være mulig å forenkle innlekking. Spesielt for overvannsmodeller med store permeable områder bør innhenting av grunnvannsparemetre prioriteres.

### Parameterendring

Endring av initialverdi til kalibrerte parameterverdier er vist i tabell 4.4. De største prosentvise endringene fra initialverdiene er ruhet for kanaltverrsnitt, ruhet for impermeable flater og hydraulisk konduktivitet. For noen av parameterne avviker ikke initialverdiene så mye fra de kalibrerte verdiene. For de permeable delfeltene er endringene i parameterverdi liten. En av årsakene er at de permeable flatene gav lite avrenning, og at endringer i kalibreringen dermed ikke førte til en vesentlig endring for vannføringen.

**Tabell 4.4:** Verdier for parameterne etter kalibrering.

Variabler	Enhet	Initialverdi	Kalibrert verdi	Endring
Andel Imp.areal	(%)	6, 12, 17, 35	5.2, 10.4, 15.6, 31.2	-11.5 %
imp. D-store	(mm)	1.75	1.32	-23.6 %
Per. D-store	(mm)	3.81	3.39	-11.0 %
N-imp	(s/[m <sup>1/3</sup> ])	0.033	0.012	-63.6 %
N-per	(s/[m <sup>1/3</sup> ])	0.410	0.418	2.0 %
N-rør	(s/[m <sup>1/3</sup> ])	0.016	0.013	-18.8 %
N-Kanal	(s/[m <sup>1/3</sup> ])	0.185	0.043	-76.8 %
Zero% imp	(%)	12.5	10	-20.0 %
Suction Head	(mm)	250	236.6	-5.4 %
Conductivitet	(mm/t)	0.9	0.44	-51.1 %
Initial Deficit	(fraction)	0.366	0.350	-4.4 %

## Delfelt

Nedbørsfeltet er delt inn i 208 delfelt med størrelser mellom 0.13 og 3.3 hektar. Hvis modellen bygges opp manuelt, kan færre delfelt gjøre jobben enklere. Det blir da et mindre antall delfelt å endre, men det blir også færre innløpspunkter i ledningsnett. Mange mindre delfelt vil gi stor variasjon i helning. Enkelte delfelt vil da få lavere eller høyere helning enn hvis større delfelt ble brukt, der helning blir en mer gjennomsnittlig verdi. Hvis dette antallet reduseres, kan det gi redusert nøyaktighet for ledningsgrenene i utkantene av nedbørsfeltet. Hvis formålet med modellen er simulering av totalvannføring eller effekten av fordrøyingstiltak kan det benyttes færre delfelt, men det må avveies i forhold til tidsbesparelsen. Det er gunstigst med mange mindre delfelt for økt nøyaktighet i ytterkantene av overvannsnett. For å generere feltene kan GIS-programmer brukes eller de kan tegnes opp manuelt. Det kan være mange usikkerheter ved digitale terrengeanalyser som benytter høydedata. Befaring av nedbørsfeltet vil kunne redusere risiko for feil, og gir modellbyggeren bedre oversikt.

## Helning

Helningen for case-området er beregnet individuelt for de ulike delfeltene. Det er også mulig å generalisere helning, men kapasitetsberegninger for de ytterste ledningstrekkene kan da bli mindre nøyaktige. Dersom helningen blir beregnet med høydedata i et GIS-program, vil dette gi den beste verdien for delfeltene. Helningen kan også kalibreres selv om den er beregnet, og bør da kalibreres med prosentvis verdiendring. “Case-området” har stor variasjon i helning og det ble derfor brukt individuell helning for de ulike delfeltene. Tidsbruken må for større individuelle endringer avveies mot usikkerheten ved

å forenkle.

### **Feltbredde**

Gjennom oppbygningen av modellen er det gjort noen erfaringer rundt feltbredden. Det er flere metoder for beregning av bredde for delfeltene, men det kan være vanskelig å finne en teoretisk tilnærming som gjengir virkeligheten. Plasseringen av kummer og vannstrømning i delfeltet gjør bredde til en komplisert parameter å beregne uten GIS-programmer. I kalibrering kan bredden benyttes for å justere tilrenningstiden fra det tilhørende delfeltet. Bredden kan også settes lik for alle delfeltene. Dette vil i teorien gjøre modellen mindre realistisk, men kan for noen områder være en nødvendig og tilfredsstillende forenkling. Konsentrasjonstid for delfeltene blir ikke lik for generalisert bredde så lenge areal til feltene varierer. Det er en del usikkerheter knyttet til måling av bredde på tvers av delfeltene og hvordan dette bør gjøres. I dette studiet ble modellen ikke kalibrert for bredde, og benytter derfor de målte verdiene.

### **Impermeable flater**

Impermeable flater har stor betydning for avrenningsvolumet. Tabell 4.4 viser at verdien for impermeabilitet ble redusert med 11.5 prosent i kalibreringen. Inndeling i fire kategorier, slik som det ble gjort i Kourtis mfl. (2017), påvirket tiden det tok å legge inn de ulike verdiene i modellen for kalibreringen. Denne metoden gir bedre nøyaktighet for avrenningen fra de ulike delene av nedbørsfeltet. Fordeling av impermeabilitet i ulike kategorier har mindre å si for den totale vannføringen nederst i overvannsnett, og mer å si for vannføringen i ytterpunktene av overvannsnett. En overvannsledning som går fra en parkeringsplass vil få høyere vannføring, og en fra skogsområder mindre. Delfeltene ble i oppgaven inndelt i fire kategorier grunnet tidsbruken, selv om en individuell fordeling ville gitt mindre usikkerhet.

### **Åpen bekk/kanal**

Åpne tverrsnitt er viktig for delene av modellen oppstrøms bekken. En forenklet metode, ved å benytte store rørdimensjoner med høy ruhet istedenfor åpne tverrsnitt, ble vurdert i modelloppbygningen. Den forenklede metoden ble ikke valgt ettersom en lukket rørledning har et maksimalt volum og kan gå fullt, men hvis vannet i en bekk hindres vil det ikke gi noen forskjell for modellen oppstrøms. For kapasitetsberegninger er det derfor viktig å ikke bruke lukkede tverrsnitt. Hvis modellen skal brukes til analyse eller endring for deler av strekningene med bekk kan det være fornuftig å finne høyder og tverrsnitt flere steder for bekken og legge dette inn i SWMM. Programmet HEC-RAS kan benyttes for å generere tverrsnitt til bekker. Hvis tverrsnittet generaliseres er det viktig at bekkens kapasitet ikke blir redusert. Ruheten for kanalstrekningene ble endret betydelig under



kalibreringen. I tabell 4.4 er initialverdien redusert med 77 prosent.

### Ruhet for delfelt

Ruhet for permeable flater kan bestemmes for hvert individuelle delfelt. Modellen har inndelt ruhet i permeable og impermeable flater. Kalibreringen av ruhet for de permeable flatene endret initialverdiene med to prosent (tabell 4.4). Ingen av nedbørshendelsene gav betydelig avrenning fra de permeable flatene, og ruhet hadde dermed lite å si for den totale vannføringen. Ruheten for de impermeable flatene ble endret 64 prosent (tabell 4.4). Endring i ruhet for de impermeable flatene hadde stor innvirkning for responstiden til modellen. En kategorisering av de forskjellige impermeable flatene kunne økt nøyaktigheten til modellen.

### Ruhet for rørledningene

Ruhet for rørledningene ble endret 19 prosent under kalibrering (tabell 4.4). Ruheten ble generalisert selv om det for flere strekninger fantes informasjon om materialtype. Den forenklede metoden ble brukt for å redusere tidsbruken. En annen fremgangsmåte for å bestemme ruhet kunne vært å dele rørledningene inn i to kategorier, en for betong- og en for plastrør. For mer nøyaktighet og hvis materialtype er tilgjengelig for hele overvannsnett, kan rørene med fordel deles inn i kategorier for betong-, metall-, og plastrør.

### Gropmagasinering

Endring av gropmagasinering i modellen har størst effekt for mindre hendelser, og den første vannføringstoppen i en nedbørshendelse. Gropmagasineringen for impermeable flater ble endret 24 prosent, og elleve prosent for permeable (4.4). Endringen for de permeable flatene har mindre påvirkning på total vannføring, da få hendelser førte til permeabel avrenning. For simulering av mindre nedbørshendelser etter tørrperioder hadde gropmagasineringen mye å si. En hendelse med flere vannføringstopper kan derfor være godt egnet for kalibrering av gropmagasinering.

### Andel impermeable flater uten gropmagasinering(*zero% imp*)

For andelen tette flater uten gropmagasinering ble endringen i kalibreringen 20 prosent (4.4). Få tidligere studier har kalibrert for *zero% imp*. I utgangspunktet vil kalibreringen av gropmagasinering påvirke vannføringen mer enn andelen tette flatene uten gropmagasinering, og når parameterverdien for *zero% imp* er ti prosent vil den ha lite å si for den totale vannføringen. For mindre nedbørfelt med stor variasjon av gropmagasineringen kan den ha en effekt for hendelsene der flatene uten gropmagasinering som hustak vil gi

en tidligere avrenning enn flatene med gropmagasiner. For videre studier for større nedbørsfelt kan det være mulig å anta denne parameterverdien uten kalibrering.

## Infiltrasjon

Få nedbørhendelser var store nok for kalibrering av infiltrasjon. Hendelsene gav ikke avrenning fra de permeable flatene selv ved lav *conductivity* (hydraulisk ledningsevne). For kalibrering av infiltrasjon ville det vært ønskelig med større nedbørhendelser. En måling av infiltrasjonskapasitet ville vært en god indikator for å bestemme kalibreringverdiene. For å redusere usikkerheten bør flere infiltrasjonsundersøkelser gjennomføres for ulike deler av nedbørsfeltet.

## 4.4 Generalisering/Forenklinger

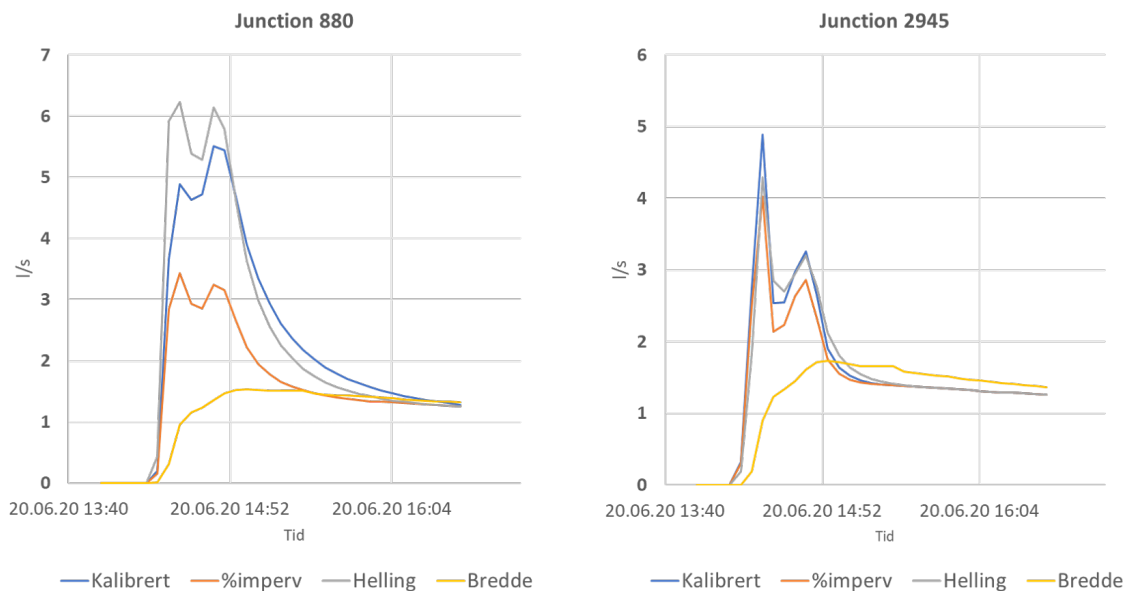
Endringer som er individuelle for de ulike delfeltene kan være tidkrevende å modellere. En generalisering av parameterne kan derfor spare tid, men vil kunne føre til at modellen får større usikkerhet/avvik. Helning og bredde ble ikke generalisert i modellen for caseområdet. Andelen impermeable flater ble generalisert til fire feltyper med lignende andel tette flater. Tabell 4.5 viser resultatene for nedbørsfeltene i modeller der helning, bredde eller andel impermeable flater blir generalisert.

**Tabell 4.5:** Volum faktor ( $Q_{obs}/Q_{sim}$ ), NSE og KGE for generalisert modell.

Nedbørhendelse	Helning			Bredde			Impermeabilitet		
	Volum	NSE	KGE	Volum	NSE	KGE	Volum	NSE	KGE
Hendelse 1	0.97	0.78	0.89	1.14	0.50	0.62	1.10	0.80	0.82
Hendelse 2	0.84	0.66	0.70	0.80	0.24	0.59	0.78	-0.29	0.31
Hendelse 3	1.00	0.54	0.77	1.00	0.51	0.72	1.07	0.59	0.78
Hendelse 4	0.65	-0.29	0.39	0.66	-0.30	0.36	0.73	0.12	0.48
Hendelse 5	0.94	-1.92	-0.42	1.01	-1.46	-0.17	1.05	-0.92	-0.10
Hendelse 6	2.00	0.52	0.22	1.60	0.85	0.59	1.70	0.83	0.57
Hendelse 7	2.57	-0.64	0.10	2.48	-1.59	0.24	2.60	-1.72	0.24
Hendelse 8	1.29	-0.29	0.06	1.33	0.00	0.22	1.41	-0.05	0.27
Hendelse 9	1.35	0.52	0.61	1.39	0.63	0.66	1.47	0.51	0.60
Hendelse 10	1.10	0.58	0.70	1.18	0.60	0.76	1.23	0.59	0.76
Hendelse 11	0.99	-0.01	0.46	1.20	0.39	0.74	0.99	-0.46	0.23
Hendelse 12	1.53	0.18	0.49	1.50	0.17	0.59	1.63	0.03	0.55
Hendelse 13	3.09	-2.26	0.00	3.00	-5.40	0.19	3.19	-5.76	0.17
Hendelse 14	2.09	-1.14	0.28	2.09	-1.16	0.33	2.25	-1.45	0.25
Hendelse 15	1.78	-0.59	0.10	1.80	-0.55	0.13	1.90	-0.68	0.09
Hendelse 16	1.91	-0.09	-0.14	1.81	-0.20	-0.13	1.79	-0.14	-0.04
Hendelse 17	1.42	0.39	0.35	1.34	0.56	0.61	1.37	0.61	0.66
Hendelse 18	1.33	-0.09	0.73	1.37	-0.37	0.64	1.34	-0.18	0.69
Hendelse 19	1.08	0.85	0.90	1.18	0.72	0.64	1.12	0.74	0.82
Vektet for varighet	1.53	-0.23	0.34	1.52	-0.39	0.40	1.58	-0.54	0.34
Nedbør m/tørrperiode	1.18	0.36	0.51	1.15	0.34	0.55	1.20	0.25	0.52
<b>Snitt fra kalibrert modell</b>									
Vektet for varighet	1.49	-0.46	0.39	1.49	-0.46	0.39	1.49	-0.46	0.39
Nedbør m/tørrperiode	1.11	0.38	0.55	1.11	0.38	0.55	1.11	0.38	0.55

Resultatene i tabell 4.5 viser at snittverdiene blir noe lavere enn for den kalibrerte modellen. Av helning, bredde og andel tette flater er det generalisering av bredde som gir de beste verdiene. Selv om bredden eller helning generaliseres vil det ikke føre til lik konsentrasjonstid for delfeltene så lenge arealet er ulikt. Generaliseringen kan gi gode simuleringsresultater for vannføringen nederst i nedbørsfeltet, men det mulig at vannføringen i andre deler av nedbørsfeltet ikke stemmer. Områder som har liten helning på overflaten, har ofte svak helning på overvannsledninger også. Hvis helningen øker blir det raskere tilførsel av vann i ledningsstreck og risiko for oppstuvning i rør vil øke. Dersom gjennomsnittshelningen brukes, vil helningen som tidligere var stor få ett mindre fall og avrenning til systemet blir tregere. For delfelt der helning reduseres vil derfor risiko for oppstuvning i modellen bli lavere enn i virkeligheten. Endringer i bredde kan føre til samme problemstilling som endring i helning. En generalisert andel tette flater

kan føre til mer simulert avrenning til overvannsnettlet i områder med mye grøntarealer og redusere mengden avrenningen for områder med parkeringsplasser, hustak, eller andre tette flater. Det er derfor generaliseringen kan gi gode resultater for avrenning nederst i nedbørsfeltet, men føre til større avvik i andre deler av overvannsnettlet.



**Figur 4.8:** Simulert vannføringen i kum 880 og 2945 ved generaliseringer.

For å undersøke hvilken effekt generaliseringen av helning, bredde og andel impermeable flater har for andre deler av nedbørsfeltet, simuleres vannføringen for to kummer i ytterkanten av ledningsnettlet. En av kummene (junciton 880) i figur 4.8 får avrenning fra to delfelt som har høy andel impermeable flater og lav helning. Den andre kummen (junciton 2945) får avrenning fra to delfelt med mindre impermeabilitet og stor helning. Referansevannføringen er den kalibrerte modellen uten generalisering. Figur 4.8 viser tydelig at bredde er parameteren som gir mest redusert nøyaktighet. Andelen impermeable flater gir også tydelig redusert vannføring. For nedbørshendelsen som ble simulert er det ikke avrenning fra permeable flater, derfor blir forskjellen ekstra stor for denne hendelsen. Endringen av impermeabilitet for de to delfeltene som gir avrenning til junciton 2945, var liten og gir derfor ikke mye utslag. Endring i helning gir størst utslag for junciton 880 som før generaliseringen hadde en helning på under ett prosent.

Størst endring i vannføring for junciton 880 og junciton 2945 er generaliseringen av bredde. Når den generaliserte bredden ble kalibrert mot den observerte vannføringen ble bredden kun tretten meter. Snittbredder for den kalibrerte modellen uten generalisering er nærmere 60 meter. En generalisering av bredden gir dårligere nøyaktighet for ytterkantene av nettlet, selv om den totale vannføringen som måles i målekummen gir gode volum, NSE og KGE verdier. Fra figur 4.8 er det tydelig at bredden ikke bør generaliseres, men

at endring i helning ikke fører til like store endringer i overvannsnett. Det er større usikkerhet rundt bruken av modeller med generaliserte parameterne. Hvis generaliseringer benyttes må modellbyggeren forstå hvilke resultater som blir påvirket.

## 4.5 Metodikk

Metodikken i tabell 4.6 er et verktøy for modellering, kalibrering og verifisering av overvannsmodeller. For noen punkter er det flere alternative valg. Det første alternativet gir høyest nøyaktighet, og videre alternativer gir lavere nøyaktighet. Noen av alternativene har også flere underpunkter. Metodikken er laget som et hjelpemiddel, og er basert på erfaringer og resultater fra litteratur og “case-studien” i denne oppgaven. For punktene under “1. Modell oppbygning” er mulige problemer og løsning presentert.

**Tabell 4.6:** Metodikk for oppbygning, kalibrering og verifisering av modell.

<b>1. Modell oppbygning</b>	
1.1 Doble punkter	<p>Problem: Når ledningsnett fra GEMINI VA legges inn i SWMM vil det kunne forekomme ekstra punkter der det i virkeligheten kun er ett punkt.</p> <hr/> <p>Løsning: Ett punkt slettes, og røret føres til gjenværende punkt.</p>
1.2 Manglende sammenkobling	<p>Problem: To ledninger mangler korrekt sammenkobling i modellen.</p> <hr/> <p>Løsning – Nytt punkt (junction) der rørene krysser. Eksisterende rør kobles mot det nye punktet</p>
1.3 Manglende høyde	<p>Problem: Kummer og sammenkoblinger mangler innmålte høyder</p> <hr/> <p>Løsning: Interpolering mellom kjente punkter. Kum må da ligge under terrenghøyde</p>
1.4 Motfall	<p>Problem: For noen strekninger i modellen kan det være motfall. Dette kan skyldes feil i innmålinger.</p> <hr/> <p>Løsning: Endre høyden til et minimumsfall. (f.eks. 0,1 prosent) slik at det blir fall i riktig retning.</p>
1.5 Feil retning på vannstrømning	<p>Problem: Feil kobling av innløp og utløp i modell. SWMM behøver korrekt retning på rør for riktig rapportering av resultat.</p> <hr/> <p>Løsning: Innløp- og utløpspunkt byttes om.</p>

Tabell 4.6 fortsettelse fra forrige side

1.6 Kommentar	<p>Grunnlagsdata med størst betydning er dimensjoner og høyder på rør og kummer. Doble punkter, manglende sammenkobling eller retning for vannstrømning må utbedres for at modellen skal fungere, men endringer på dimensjoner og høyder bør holdes til et minimum. For strekninger med innmålt motfall kan forenklingen ved å endre fallet øke usikkerheten i modellen.</p>
<b>2. Delfelt</b>	
2.1 Antall	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Benytt flere mindre delfelt for å få en realistisk vannføring i kummer høyt oppe i nedbørsfeltet, men en kum skal kun være utløp til maks ett delfelt.</li> <li>2. For måling av effekten til fordrøyning og flomanalyser for nedre del av nettet er det mindre behov for mange delfelt.</li> </ol>
2.2 Delfelt	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Finn utløpspunkter og generer delfeltene for disse i GIS-program.</li> <li>2. Tegn delfelt med kart over vannstrømning i «backdrop»</li> <li>3. Benytt NEVINA eller lignende program for å generere hele nedbørsfeltet. Del nedbørsfeltet inn i mindre delfelt.</li> </ol>
2.3 Kommentar	<p>Færre delfelt øker usikkerheten for vannføringen i ytterkantene av overvannsnettet. Riktig areal er viktig for det simulerte totalvolumet. Flere delfelt kan føre til et større arbeid for endringer av individuelle parametere. Det kan være mange usikkerheter ved terrengeanalyser med høydedata. Befaring av nedbørsfeltet reduserer risiko for feil, og gir modellbyggeren bedre oversikt.</p>
<b>3. Parameter</b>	
3.1 Helning	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Generer helning i GIS-program for de ulike delfeltene.</li> <li>2. Mål høyden i delfeltet med f.eks. høydedata og vekte det for gjennomsnitt fra f.eks. NEVINA</li> <li>3. Generalisere helning for alle delfeltene. Kan finne gjennomsnitt fra NEVINA.</li> </ol>
3.2 Bredder	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Generer bredde i GIS-program for de ulike delfeltene.</li> <li>2. Mål bredden for delfeltene manuelt ved å se på areal og strømningsretningen for vannet.</li> <li>3. Generaliser breddene for alle delfelt.</li> </ol>

**Tabell 4.6 fortsettelse fra forrige side**

3.3 % impermeabilitet	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Benytt programvare til å finne prosentfordeling for de ulike overflatene i delfeltet fra FKB-data.</li> <li>2. Fordel delfeltene inn i 3-4 kategorier med ulik impermeabilitet.</li> <li>3. Generaliser impermeabilitet for alle delfelt.</li> </ol>
3.4 Gropmagasinering	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Benytt målte verdier for vært delfelt.</li> <li>2. Benytt verdier fra litteratur for ulike typer underlag (gress, skog, asfalt, betong, hustak etc.)</li> <li>3. Benytt middelvei mellom min-maks verdi.</li> </ol>
3.5 Ruhet - delfelt	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Benytt målte verdier for vært delfelt.</li> <li>2. Benytt manningstallet for typen underlag i delfeltet</li> <li>3. Benytt samme generaliserte manningstall for alle delfeltene.</li> </ol>
3.6 Ruhet - rørledninger	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Benytt ruhut med hensyn på de ulike rørmaterialene.</li> <li>2. Benytt samme ruhut for alle rørledninger.</li> </ol>
3.7 Åpen bekk/kanal	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Finn tverrsnitt, helning og ruhut og legg inn som irregulært tverrsnitt for strekningen. Tapskoeffisient for inn og utløp bør også legges inn.</li> <li>2. Finn et tverrsnitt for strekningen, benytt jevnt fall, kalibrer for ruhut.</li> </ol>
3.8 Kommentar	<p>For modeller der ytterpunkter skal analyseres bør ikke bredde eller andel impermeable flater generaliseres. Kategorisering av parameterne vil gi bedre grunnlag enn gjennomsnittsverdi for alle delfelt. Gropmagasinering og ruhut kan forenkles hvis det ikke er forventet store ulikheter. Areal/dimensjon for bekketverrsnitt er viktig, men det antas at utforming og ruhut kan forenkles uten store utslag i modellen.</p>
<b>4. Naturlige prosesser</b>	
4.1 Infiltrasjon	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Grunnundersøkelser for infiltrasjonskapasitet bør benyttes.</li> <li>2. Infiltrasjonskart for området benyttes for å bestemme spekteret(min/maks) som skal brukes i kalibreringen.</li> </ol>
4.2 Grunnvann	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hvis parameter og verdier for grunnvann er kjent, bør dette legges inn.</li> <li>2. Hvis innlekking fra grunnvann er nødvendig for modellen, men grunnvannsverdier ikke er kjent, kan RDII benyttes. RDII bør ikke ha for lang varighet for å hindre effekten på senere nedbørshendelser.</li> </ol>

Tabell 4.6 fortsettelse fra forrige side

4.3 Fordamping	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Benytt målt fordamping for området.</li> <li>2. Benytte månedlig snittverdi fra de siste årene (dette er lurt for simulering med nedbør fra IVF kurve)</li> <li>3. Gjennomsnittsverdi for alle månedene.</li> </ol>
4.4 Kommentar	<p>Om modellen skal brukes til analyse av ekstremvær eller vannbalanse over lang tid er avgjørende for hvor mye innsats man bør legge ned i naturlige prosesser. For analyse av ekstremvær vil grunnvann utgjøre minimalt av den totale vannføring. Av de naturlige prosessene er det infiltrasjon og grunnvann som er viktigst for modellen. Grunnvann og infiltrasjonsverdier har mye å si for nedbørshendelser som treffer uten tørrperiode i mellomtiden, og for vannbalanse over lang tid. Fordamping vil bety mindre for den enkelte nedbørhendelsen.</p>
<b>5. Sensitivitetsanalyse</b>	
5.1 Parameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensitivitetsanalysen benyttes for å finne kalibreringsrekkefølge.</li> <li>• Finn minimum og maksimums verdier for de ulike parameterne. Minst mulig forskjell på min. og maks. verdier vil fungere best og bør bestemmes med feltinformasjon eller litteratur.</li> <li>• Kjente parameter som ikke skal kalibreres trenger ikke å brukes i analysen.</li> </ul>
5.2 Formel	$\text{Sensitivitet} = (\Delta MR / MR) / (\Delta p / p)$ $\text{Volum} = Q_{obs} / Q_{sim}$
5.3 Verdier	<p>Minimum og maksimums verdier benyttes som ytterpunkter. For økt nøyaktighet kan flere verdier testes, men alltid teste for initial, minimum- og maksimumsverdi.</p>
5.4 Kommentar	<p>Sensitivitetsanalysen er viktig for hvilken rekkefølge modellen kalibreres. Hvis denne utelukkes kan det bety at modellen må gjennom flere kalibreringsrunder enn det som er nødvendig. Parameteren med størst volumendring skal helst kalibreres først.</p>



Tabell 4.6 fortsettelse fra forrige side

<b>6. Kalibrering</b>	
6.1 Nedbørshendelse	<p>1. Hvis lange måleperioder er tilgjengelig, er det lurt å finne hendelser med ulik avrenning som beskrevet under.</p> <p>1.1 Finn hendelser med tørrperiode i forkant som ikke gir avrenning fra de permeable flatene.</p> <p>1.2 Finn hendelser med tørrperiode i forkant som er store nok til å gi avrenning fra de permeable flatene.</p> <p>1.3 Finn hendelser uten tørrperiode som gir avrenning fra hele nedbørsfeltet.</p> <p>2. Hvis ikke lange måleperioder er tilgjengelig, er det lurt å finne store hendelser, særlig hendelser med tørrperiode i forkant.</p> <p>2.1 Kjør kalibrering for hendelsene. Bruk skjønn til å neglisjere hendelser hvis de avviker veldig.</p>
6.2 Simulering i kalibreringen	<p>1. Kjør automatisert simulering.</p> <p>2. Manuell simulering for stor variasjon i parameterverdi (f.eks. 10 ulike verdier)</p> <p>3. Manuell simulering for færre verdivariasjoner.</p>
6.3 Effektivitetsligninger	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Benytt volum, KGE og NSE for å finne beste verdi. (kan også bruke flere kriterier)</li> <li>• Legg vekt på Volum for de første parameterne og deretter KGE. NSE kan benyttes der KGE ikke gir entydig svar.</li> </ul>
6.4 Rekkefølge nedbør	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kalibrer for nedbørhendelser funnet i punkt 1.1 (steg 6.1). Trenger ikke å kalibrere infiltrasjon for dette punktet.</li> <li>• Full kalibrering for nedbørshendelser i punkt 1.2 (steg 6.1).</li> <li>• Full kalibrering for nedbørshendelser i punkt 1.3. (steg 6.1)</li> </ul>
6.5 Rekkefølge parameter	<p>1. Kalibrer først parameter som gir størst volumforskjeller.</p> <p>2. Kalibrer så etter sensitivitetsrekkefølgen.</p>
6.6 Kommentar	<p>Fremgangsmåten for kalibrering kan være lik for en automatisk og en manuell kalibrering. Den automatiske kalibrering vil ta kortere tid å gjennomføre, men kan bestå av de samme stegene som en manuell kalibrering. For kalibrering med flere typer nedbørshendelser som beskrevet i 6.4 må hele kalibreringsprosessen gjennomføres for punkt 1.1 til 1.3 (steg 6.4). Kalibreringen tar lenger tid, men modellen vil bli bedre for å simulere nedbørshendelser av ulik størrelse.</p>

Tabell 4.6 fortsettelse fra forrige side

<b>7. Validering</b>	
7.1 Nedbør	1. Finn nedbørshendelser som ikke gir avrenning fra impermeable flater, og finn nedbørshendelser som gir avrenning fra permeable flater. 2. Finn større nedbørshendelser, gjerne flere typer.
7.2 Valideringsmetode	Benytt NSE og Volum for validering KGE kan også brukes, og spesielt for $NSE > 0.5$ .
7.3 Validering	Test kalibrert modell mot nedbørhendelsene. NSE og Volum benyttes for å validere. Generelt er $NSE > 0.5$ en akseptabel modell, men avhenger av hva modellen skal brukes til.
7.4 Kommentar	Effektivitetsligningene er gode for validering av metoden, men en validering må alltid vurdere resultatet opp mot hva modellen skal brukes til. Noen forenklinger gir mindre gode muligheter for analyse for deler av overvannsnettet. En modell kan oppnå gode NSE verdier for vannføringen nederst i nedbørsfeltet uten å gi gode vannføringer i modellens ytterpunkter. For modeller med lav NSE, kan KGE også benyttes. Det finnes også flere effektivitetsligninger som kan benyttes.

Metodikken er basert på valgene som er gjort i oppgavens “case-området” og forsøk på forenklinger. De første og beste valgene vektlegger gode datagrunnlag og bygger på litteratur som viser at modeller med gode datagrunnlag ofte blir bedre og er enklere å kalibrere. Selv om overvannsmodellen ble bygget opp i EPA SWMM gir metodikken generelle alternativer/anbefalinger som gjelder for de fleste programmer for modellering og simulering av overvannssystemer. Metodikken har fungert for “case-området” og vil være et godt verktøy for lignende områder. Samtidig har metodikken utviklingspotensiale spesielt med hensyn til grunnvansmetoder, plassering av nedbør- og vannføringsmålere, og en verifiseringsrangering for hva den kalibrerte modellen kan brukes til.

## 5. Konklusjon

Konklusjonen besvarer forskningsspørsmålene gjennom erfaringer og resultater fra oppgaven. Det er derfor ikke sikkert at alle funn har stor overføringsevne for andre geografiske områder. Usikkerhet og manglete datagrunnlag kan ha ført til usette feilkilder i modelloppbygning, kalibrering og verifisering.

For modelloppbygningen i oppgaven var det essensielt med data for areal, plassering, høyder og dimensjoner for rørledninger og kummer. Når det gjelder mangelfullt datagrunnlag, har det vist seg at oppbygning kan gjøres ved tilnærming og interpolering, og manglende parameterverdier kan hentes fra litteratur og kartdata.

En manuell kalibrering av overvannsmodeller fungerer ofte på samme måte som en automatisk kalibrering, men tar lengre tid. Ved manuell kalibrering må en parameter kalibreres av gangen. I denne oppgaven ble det brukt ti parameterverdier i et spekter mellom maks- og minimumsverdi for å finne det beste resultatet. Parameterverdien som gav best resultat for KGE, NSE og volum bruktes videre i modellen. De mest kritiske parameterverdiene for kalibreringen var andel tette flater, feltbredde og infiltrasjonsdata. Det er også essensielt med gode måledata for nedbør og vannføring for å gjennomføre kalibreringen. For å verifisere en modell måtte det tas hensyn til hele modelloppbygning, og ikke bare samsvaret mellom målt og simulert vannføring i én målekum. Verifiseringen mot vannføring i målekum sier ikke direkte noe om vannføringen i andre deler av overvannsnettet. For å verifisere en modell må generalisering og parametervalg vurderes for de ulike delene av overvannsnettet. For mye generalisering og forenkling vil gjøre modellen spesielt dårlig egnet for lokale kapasitetsberegninger.

En metodikk for oppbygning, kalibrering og verifisering bør inneholde steg for oppbygningen av overvannsmodellen, og hvordan en kan bygge en modell med ufullstendig grunnlagsdata. En bør vise steg for valg av parametere fra litteratur, og hvilke naturlige prosesser modellbyggeren bør vurdere å implementere i modellen. Metodikken bør gå inn på flere alternativer for de enkelte valgene/stegene. Usikkerheten i metodikken vil øke med antallet forenklinger som blir gjort. For de ulike stegene vil usikkerheten ha forskjellige konsekvenser, men generalisering av de essensielle parametrene vil gi stor usikkerhet for vannføringen i overvannsnettet. Modellbyggeren bør selv vurdere risiko ut ifra hva modellen skal brukes til.

## 5.1 Videre arbeid

Med utgangspunkt i det utførte mastergradsarbeidet foreslås det å etterprøve og videreutvikle metodikken for andre nedbørsfelt, med ulik grad av urbanisering og helning. Parametere for grunnvann bør undersøkes, og modellering med grunnvann bør legges inn i metodikken. Modellen bør kalibreres mot større nedbørshendelser for avrenning fra permeable flater, og den bør verifiseres for flere kontrollpunkter i ytterkantene av overvannsnett. For å kunne sammenligne modeller enklere, kan det bygges opp en metodikk for å rangere verifiseringene, og på den måten indikere hva modellen kan brukes til, og hvor godt den vil fungere.

For Nordre Follo kommune kan modellen simuleres for forurensningstilførsel. Kolbotnvannet, som er resipienten til nedbørsfeltet, har store problemer med vannkvalitet. Simuleringer av nedbørsfeltet med fokus på nitrat kan gi en overordnet pekepinn på forurensningskilde. Modellen kan også brukes til kapasitetsberegninger, og for å undersøke oppstuvning og flaskehals ved store nedbørshendelser.

# Referanser

- Aburayya, H. (2017). Modelling av overvann og vurdering av tilførsler av tungmetaller fra Jessheim nedbørfelt til Nordbyttjern. Master. Norwegian University of Life Sciences. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2465478/Aburayya2017.pdf.pdf?sequence=1%7B%5C%7DDisAllowed=y>.
- Adolfson, M. W. (2019). Sammenlikning av tiltak for overvannshåndtering – Prosjekt Bekkestua Sør. Master. Norwegian University of Life Sciences. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2625600/Adolfson2019.pdf?sequence=1%7B%5C%7DDisAllowed=y>.
- Arjenaki, M. O., Sanayei, H. R. Z., Heidarzadeh, H. og Mahabadi, N. A. (2020). *Modeling and investigating the effect of the LID methods on collection network of urban runoff using the SWMM model (case study: Shahrekord City)*. DOI: 10.1007/s40808-020-00870-2.
- Autodesk (2020). *Civil 3D*. URL: <https://www.autodesk.com/products/civil-3d/features?plc=CIV3D%7B%5C%7Dterm=1-YEAR%7B%5C%7Dsupport=ADVANCED%7B%5C%7Dquantity=1> (sjekket 13.12.2020).
- Brennhovd, B. (2014). Målt og modellert avrenning. Analyse av ledningsnett og urbanstasjon på Vestli i Oslo. Master. Norwegian University of Life Sciences. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/218104/BirgitteBrennhovdMasteroppgave.pdf?sequence=1%7B%5C%7DDisAllowed=y>.
- Buhler, L. (2013). Analyse av klimaendringens påvirkning på Rustadfeltet med kalibrert modell. Master. Norwegian University of Life Sciences. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/189123/Masteroppgave%20Lars%20Buhler.pdf?sequence=1%7B%5C%7DDisAllowed=y>.
- Børtveit, H. og Petersen, S. W. (2017). Avrenningsmodell fra urbane felter til Stangelandsåna i Sandnes. Ph.d.-avh. NTNU. URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2452626>.
- Dalevold, E. (2016). Gjenåpningen av Veumbekken fra kulvert til åpen kanal. Hydraulisk analyse og modellering i SWMM. Master. Norwegian University of Life Sciences. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/2398660>.
- DHI (2020). *MIKE URBAN*. URL: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-urban> (sjekket 13.12.2020).
- Dvergsnes, E. (2016). Analyse av overvannsnettet i Ås sentrum ved bruk av simuleringsprogrammet SWMM. Master. Norwegian University of Life Sciences. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2403033/Dvergsnes2016.pdf?sequence=1%7B%5C%7DDisAllowed=y>.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. og Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377 (1-2): 80–91. DOI: 10.1016/j.jhydro.2009.08.003.

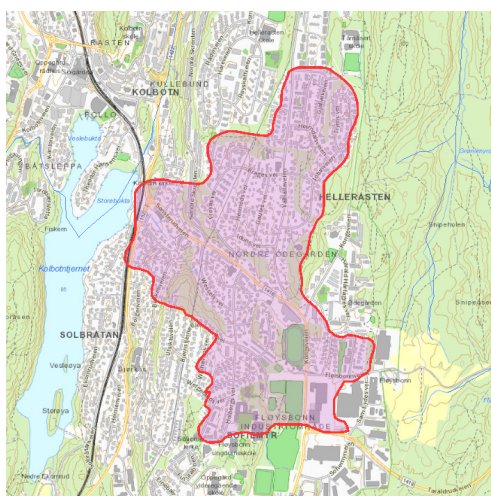
- Haqi, J. (2015). Modelling av nedslagsfeltet- Veumdalen i Fredrikstad med programmet SWMM. Master. Norwegian University of Life Sciences. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/292930>.
- Hurtig, C. M. (2019). Kapasitetsvurdering for hovedavløpssystemet i Arendal kommune ved bruk av SWMM. Master. Norwegian University of Life Sciences. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2642372/Hurtig2019.pdf?sequence=1%7B%5C%7DDisAllowed=y>.
- Ibrahim, D. D. (2017). Analyse av klimatilpasningstiltak - En casestudie av overvannsnett på Landås og Burumskogen i Ås kommune. Master. Norwegian University of Life Sciences. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/2450251?locale-attribute=en>.
- Kartverket (2014). *Høydedata*. URL: <https://hoydedata.no/LaserInnsyn/> (sjekket 13.12.2020).
- Kim, B., Sanders, B. F., Han, K., Kim, Y. og Famiglietti, J. S. (2014). Calibration of Stormwater management model using flood extent data. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*. URL: <https://escholarship.org/uc/item/88c4g4j9>.
- Klausen, J. G. (2020). Fordrøyning av takvann – vurdering av miniregnbed som lokal overvannshåndtering. Master. Norwegian University of Life Sciences. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2679724/Klausen2020.pdf?sequence=1%7B%5C%7DDisAllowed=y>.
- Knoben, W. J. M., Freer, J. E. og Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*: 1–7. DOI: [10.5194/hess-2019-327](https://doi.org/10.5194/hess-2019-327).
- Kourtis, I. M., Kopsiaftis, G. og Tsihrintzis, V. A. (2017). Calibration and validation of SWMM model in two urban catchments in Athens, Greece. *15th International Conference on Environmental Science and Technology*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/319465255\\_Calibration\\_and\\_validation\\_of\\_SWMM\\_model\\_in\\_two\\_urban\\_catchments\\_in\\_Athens\\_Greece](https://www.researchgate.net/publication/319465255_Calibration_and_validation_of_SWMM_model_in_two_urban_catchments_in_Athens_Greece).
- Kvernhaugen, F. T. (2020). Personlig kommunikasjon. epost 30. september. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Köz, U. og Sigrist, A. (2015). *Overvannshåndtering og flomsikring*. Tekn. rapp. Asplan Viak. URL: <https://docplayer.me/41238990-1-innledning-bakgrunn-dagens-situasjon-fordroyningseffekt-ved-flom-malsetting-grunnlag-for-dimensjonering.html>.
- Lee, J. G., Nietch, C. T. og Panguluri, S. (2017). SWMM Modeling Methods for Simulating Green Infrastructure at a Suburban Headwatershed: User's Guide. *U.S. Environmental Protection Agency* (October): 157. URL: [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?Lab=NRML&dirEntryId=339428](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRML&dirEntryId=339428).
- Mittet, J. (2017). A regionalisation technique for urban ungauged catchments. Master. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. URL: [https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2451784/17451\\_FULLTEXT.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2451784/17451_FULLTEXT.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Moheseen, F. A. (2015). Urban Runoff Drainage: Case of Kjelsrud in Oslo. Master. Norwegian University of Life Sciences. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/2359640>.
- Multiconsult (2017). *Kalibrering av overvannsmodell*. URL: <https://www.multiconsult.no/prosjekter/kalibrering-av-overvannsmodell/> (sjekket 12.12.2020).
- Nash, J. E. og Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. DOI: [10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).

- NGU (2020). *Løsmasser*. URL: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse> (sjekket 14.11.2020).
- NOU:2015:16 (2015). *Overvann i byer og tettsteder : Som problem og ressurs*. Tekn. rapp. Departementenes sikkerhets- og serviceorganisasjon Informasjonsforvaltning. URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/e6db8ef3623e4b41bcb81fb23393092b/no/pdfs/nou201520150016000oddpdfs.pdf>.
- NVE (2020). *Sildre*. URL: <https://sildre.nve.no/Sildre> (sjekket 29.11.2020).
- Parnas, F. E. Å. (2018). Modelling Runoff from Permeable Surfaces in Urban Areas. Master. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2567902>.
- Powel (2020). *Gemini VA*. URL: <https://www.powel.no/vann-og-miljo/VA-Ledningsdokumentasjon/gemini-va> (sjekket 13.12.2020).
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L. og Miller, N. (jan. 1983). Green-ampt Infiltration Parameters from Soils Data. *Journal of Hydraulic Engineering* 109 (1): 62–70. DOI: [10.1061/\(asce\)0733-9429\(1983\)109:1\(62\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1983)109:1(62)).
- Rosa, D. J., Clausen, J. C. og Dietz, M. E. (2015). Calibration and Verification of SWMM for Low Impact Development. *Journal of the American Water Resources Association* 51 (3): 746–757. DOI: [10.1111/jawr.12272](https://doi.org/10.1111/jawr.12272).
- Rossmann, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1 Office of Research and Development Water Supply and Water Resources Division*. Tekn. rapp. September: 353. URL: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-02/documents/epaswmm5\\_1\\_manual\\_master\\_8-2-15.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-02/documents/epaswmm5_1_manual_master_8-2-15.pdf).
- Sandstø, T. og Wesche, T. F. (2013). Gjenåpning av bekker - en casestudie av Gransbekken, Bakåsbekken og Senterbekken på Furuset i Oslo. Master. Norwegian University of Life Sciences. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/189047?show=full>.
- Sangal, S. og Bonema, S. R. (1994). A Methodology for Calibrating SWMM Models. *Journal of Water Management Modeling*. DOI: [10.14796/jwmm.r176-24](https://doi.org/10.14796/jwmm.r176-24).
- Skandsen, O. (2015). Sandnes indre havn : kartlegging av LOD- tiltak og effekten av disse. Master. Norwegian University of Life Sciences. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/294091>.
- Temprano, J., Arango, Ó., Cagiao, J., Suárez, J. og Tejero, I. (2006). Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain. *Water SA*. DOI: [10.4314/wsa.v32i1.5240](https://doi.org/10.4314/wsa.v32i1.5240).
- Tsihrintzis, V. A. og Hamid, R. (1998). Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM. *Hydrological Processes* 12 (2): 311–329. DOI: [10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199802\)12:2<311::AID-HYP579>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199802)12:2<311::AID-HYP579>3.0.CO;2-R).
- USACE (2020a). *HEC-HMS Features*. URL: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/features.aspx> (sjekket 13.12.2020).
- USACE (2020b). *HEC-RAS Features*. URL: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/features.aspx> (sjekket 13.12.2020).
- Vimalan, K. (2020). Anbefalinger for optimalisering av avrenningskoeffisienter ved bruk av SWMM tilpasset tretrinnsstrategien. Master. Norwegian University of Life Sciences. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2679775/KajanVimalan2020.pdf?sequence=1%7B%5C%7DNotAllowed=y>.
- Zaidan, K. (2018). Analyse av overvannsnett i Holtandalen i Horten kommune ved bruk av simuleringsprogrammet SWMM. Master. Norwegian University of Life Sciences. URL:

<https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2569478/Zaidan2018.pdf?sequence=1%7B%5C%7DisAllowed=y>.



# Vedlegg A. Nedbørsfeltparameter NEVINA



Kartbakgrunn: Statens Kartverk  
 Kartdatum: EUREF89 WGS84  
 Prosjeksjon: UTM 33N  
 Beregn.punkt: 264685 E  
 6637317 N

Nedbørsfeltgrenser og feltparametere er automatisk generert og kan inneholde feil.  
 Resultatene må kvalitetssikres.

## Nedbørsfeltparametere

Vassdragsnr.: 005.4B  
 Kommune.: Nordre Follo  
 Fylke.: Viken  
 Vassdrag.: Gjersjøelva

Feltparametere	
Areal (A)	1.1 km <sup>2</sup>
Effektiv sjo (A <sub>SE</sub> )	-999 %
Elvleengde (E <sub>L</sub> )	-999 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	-999 m/km
Elvegradient <sub>1085</sub> (E <sub>G,1085</sub> )	-999 m/km
Helning	4.1 °
Dreneringstetthet (D <sub>γ</sub> )	-999 km <sup>-1</sup>
Feltlengde (F <sub>L</sub> )	1.5 km

Arealklasse	
Bre (A <sub>BRE</sub> )	0 %
Dyrket mark (A <sub>JORD</sub> )	0 %
Myr (A <sub>MVR</sub> )	0 %
Leire (A <sub>LEIRE</sub> )	12.7 %
Skog (A <sub>SKOG</sub> )	17.6 %
Sjø (A <sub>SJO</sub> )	0 %
Snaufjell (A <sub>SF</sub> )	0 %
Urban (A <sub>U</sub> )	71.2 %
Uklassifisert areal (A <sub>REST</sub> )	11.2 %

Hypsografisk kurve	
Høyde <sub>MIN</sub>	97 m
Høyde <sub>10</sub>	130 m
Høyde <sub>20</sub>	145 m
Høyde <sub>30</sub>	152 m
Høyde <sub>40</sub>	155 m
Høyde <sub>50</sub>	157 m
Høyde <sub>60</sub>	159 m
Høyde <sub>70</sub>	161 m
Høyde <sub>80</sub>	164 m
Høyde <sub>90</sub>	168 m
Høyde <sub>MAX</sub>	176 m

Klima- /hydrologiske parametere	
Avrenning 1961-90 (Q <sub>N</sub> )	16.9 l/s*km <sup>2</sup>
Sommernedbør	376 mm
Vinternedbør	395 mm
Årstemperatur	5.0 °C
Sommertemperatur	13.0 °C
Vintertemperatur	-0.8 °C

Rapportdato: 25.11.2020

© nevina.nve.no







**Norges miljø- og biovitenskapelige universitet**  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway